中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

四川新市—金阳公路唐家湾滑坡变形特征和形成机理分析

程　强，周兴泉，张　肖

Kinematics and mechanism analysis of Tangjiawan landslide on the Xinshi—Jinyang Highway in Sichuan Province

CHENG Qiang, ZHOU Xingquan, and ZHANG Xiao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303027

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控制点布设方案对无人机精度测量的影响及其应用

Influence of control point number on UAV low-altitude photogrammetry and its application: A case study in subsidence monitoring of a tailing dam area in northwestern China

戴嵩, 魏冠军, 梁斌　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 113-120

无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60-65

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303027
程强, 周兴泉, 张肖. 四川新市—金阳公路唐家湾滑坡变形特征和形成机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 46-56.
CHENG Qiang, ZHOU Xingquan, ZHANG Xiao. Kinematics and mechanism analysis of Tangjiawan landslide on the Xinshi—Jinyang Highway in Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 46-56.

四川新市—金阳公路唐家湾滑坡变形特征和形成机理分析

程　强[1], 周兴泉[2], 张　肖[1]
(1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都　610041;
2. 四川省乐山市地质工程勘察院集团有限公司, 四川 乐山　614000)

摘要: 研究滑坡变形特征对于分析滑坡形成机理和制定防治措施至关重要。文章以工程诱发的唐家湾滑坡为研究对象, 通过工程施工前后的 6 期无人机影像得到高分辨率 DOM, 基于相邻两期 DOM 中识别的特征点作为监测点, 根据其位置的变化得出地表位移矢量数据, 进而结合地质勘探和深部位移监测分析滑坡变形特征和形成机理。研究表明: 工程建设前滑坡区无明显变形(第 1 个观测周期), 工程施工后的第 2 观测周期(2021-03-15—2021-06-06)、第 3 观测周期(2021-06-06—2021-09-08)和第 4 观测周期(2021-09-08—2021-11-03)滑坡主滑区平均变形速率分别为 53.0, 103.2 和 62.5 mm/d, 至第 5 观测周期(2021-11-03—2022-01-03)变形速率趋于 0; 第 2 观测周期滑坡后缘的弃渣堆载是滑坡的直接触发因素, 降雨促进了滑坡变形的发展, 而随着雨季的结束和前缘的堆载反压滑坡变形速率逐渐降低; 利用多期无人机高清影像可获取大范围、长时序地表变形信息, 可作为一种有效的滑坡变形监测手段。

关键词: 无人机影像; 数码摄影测量; 滑坡; 变形特征
中图分类号: P642.22　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1003-8035(2025)01-0046-11

Kinematics and mechanism analysis of Tangjiawan landslide on the Xinshi—Jinyang Highway in Sichuan Province

CHENG Qiang[1], ZHOU Xingquan[2], ZHANG Xiao[1]
(1. *Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd, Chengdu, Sichuan*　610041, *China*;
2. *Sichuan Leshan Geological Engineering Survey Institute Ltd, Leshan, Sichuan*　614000, *China*)

Abstract: Studying the kinematics of landslides is crucial for analyzing failure mechanism and designing remedial measures. This paper focuses on the Tandjiawan landslide that occurred during a highway construction. Five periods of high-resolution digital orthophoto maps (DOM) were generated using unmanned aerial vehicle (UAV)- based photogrammetry, spanning both pre- and post- landslide conditions. Two successive UAV orthophotos were treated as observation periods, and corresponding features were identified in both images to establish monitoring points. Furthermore, two-dimensional displacement vectors were then computed by comparing orthographic images from each observation period based on these corresponding features. The analysis of kinematics and failure mechanism were conducted in conjunction with geological surveys and inclinometer measurements. The findings reveal that there was no significant deformation in the landslide area before the engineering

收稿日期: 2023-03-13; **修订日期:** 2023-06-30　　**投稿网址:** https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目: 四川省交通运输科技项目(2020-A-01); 四川省科技计划资助项目(2022YFG0141)
第一作者: 程　强(1972—), 男, 河北滦县人, 岩土工程专业, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事山区公路工程勘察设计及研究。
E-mail: chengqiangy@163.com

construction of the highway (1st observation period). After construction, during the second observation period (March 15, 2021, to June 6, 2021), the third observation period (June 6, 2021, to September 8, 2021), and the fourth observation period (September 8, 2021, to November 3, 2021), the average deformation rates of the main sliding area of the landslide were 53.0 mm/day, 103.2 mm/day and 62.5 mm/day, respectively. By the fifth observation period (November 3, 2021, to January 3, 2022), the deformation rates had trended towards zero. The deposition of spoil at the rear of the landslide during the second observation period was the direct triggering factor, and rainfall facilitated the development of landslide deformation. As the rainy season ended and the front-end loading increased, the landslide deformation rate gradually decreased. This paper demonstrates that multi-period UAV photogrammetry can provide spatiotemporal surface deformation information for landslide areas, serving as an effective tools for landslide deformation monitoring.

Keywords: UAV images；photogrammetry；landslide；kinematics

0　引 言

滑坡是一种常见的多发性地质灾害，具有突发性强、危害大、治理难度高等特点。在山区工程建设中，不适当的开挖和填筑常诱发滑坡灾害。滑坡变形特征的研究对于分析滑坡形成机理和制定防治措施至关重要。变形监测是获取滑坡变形信息的直接手段。近年来“空、天、地”监测技术快速发展，相关学者利用各种监测技术在滑坡变形监测、预警、机理分析和防治方面取得了丰硕成果[1－2]。然而很多滑坡经历复杂的时空演化过程，且受限于复杂的地形地质条件，完整变形信息的获取非常困难。常用的地表变形监测方法（例如裂缝计、大地测量、GNSS 等）存在控制范围小、安全风险大、经费投入高等问题，很难覆盖大范围的滑坡区域。合成孔径雷达干涉测量（InSAR）能进行大范围的非接触监测，但受卫星环绕具有周期性、地面工程活动等影响，仅适用于大范围的初步调查和滑前变形信息获取；三维激光扫描虽然可获取大范围高精度数据，但受经费投入和地表通视条件等制约难以广泛应用。

无人机具有成本低、效率高、风险小的特性，近年来在滑坡调查和监测中日益得到广泛应用。首先，无人机被广泛应用于滑坡区精细地形构建和几何形态数据获取，如刘春等[3]、王俊豪等[4]、孔嘉旭等[5]、彭大雷等[6]基于无人机影像构建了大型滑坡区域精细地形，定量提取滑坡要素信息并取得滑坡精细化几何形态数据；进而，无人机被广泛应用于滑坡快速调查评价，如张欢等[7]、陈巧等[8]应用无人机摄影测量技术实现滑坡的快速调查、形变区识别和定量评价，赵婷婷等[9]基于无人机倾斜摄影测量构建了应急状态下的地质灾害快速调查技术体系。也有学者利用无人机数码摄影测量进行滑坡变形监测，如 Peternel 等[10]通过滑坡区多期无人机影像对比分析，得出了滑坡区平面位移和高程变化数据。由于滑坡往往发生突然，且涉及较长的时间演化过程，对滑坡完整变形过程的研究需获取滑前滑后的多期无人机影像数据。已有研究多受数据较少的限制，很少能全面反映滑坡的变形过程。

目前在高速公路等工程建设中，航空摄影测量技术得到广泛应用，工程项目勘察设计期间往往有可供使用的无人机影像数据。若在工程建设过程中对潜在滑坡区域或者因工程活动触发滑坡的区域进行多期无人机影像数据采集，则可较好的对滑坡变形过程进行分析研究，从而为滑坡形成机制分析和防治方案制定提供科学依据。本文结合四川省新市—金阳高速公路工程建设中的唐家湾滑坡，通过工程建设前后多期无人机影像数据对比分析，并结合大地测量、深部位移监测和地质勘探等手段，研究滑坡变形特征，分析滑坡成因，为滑坡工程防治提供依据。

1　研究区概况

唐家湾滑坡位于四川省屏山县清平乡唐家湾村向家坝水库库区（图 1）。金沙江河谷深切，两侧岸坡陡峻、次级沟谷发育，库区正常蓄水位 380 m，两侧分水岭高程多在 1 200 m 以上。滑坡位于金沙江左岸的唐家沟中游（图 1、图 2）。唐家沟沟域面积约 3.6×10^6 m^2，上游为环状汇水地貌，多为乔木覆盖；中游地形相对宽缓，除少量乔木和竹林外多开垦为耕地；下游为深切沟谷，冲沟两侧多为基岩陡壁。

地质构造上，场地主要构造形迹为北西向延伸的周家坪向斜，出露基岩为中三叠统雷口坡组白云质灰岩和上三叠统须家河组砂泥岩互层，滑坡位于向斜轴部附近（图 1）。

研究区属亚热带季风气候，雨量充沛、植被茂密。根据距滑坡区约 2.2 km 的清平乡气象观测站 2018—2021 年观测数据，平均年降水量为 1 192 mm，雨量多集

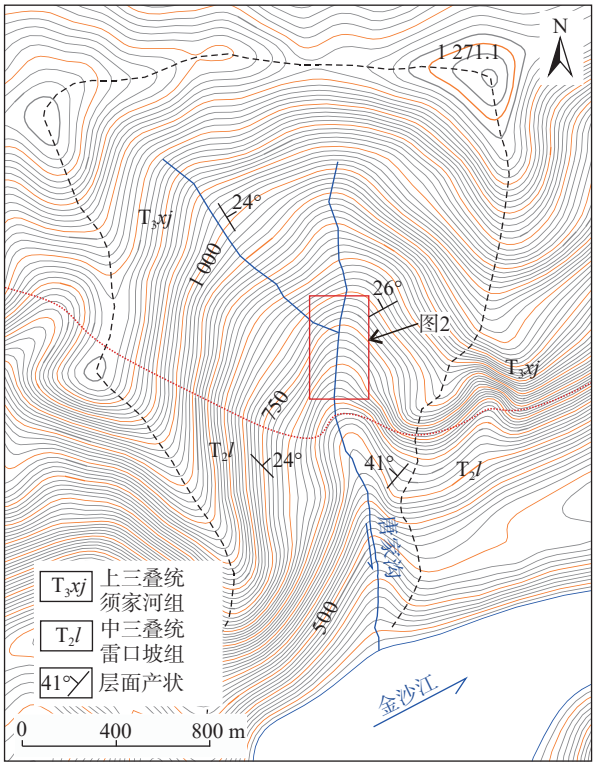

图 1　研究区地形地质图

Fig. 1　Topographic and geological map of the study area

中在 6—9 月，占全年降水量的 63 %。区内植被以乔木为主，缓坡地段多开垦为梯田。

新建新市—金阳高速公路在唐家沟沟域通过，沟谷内布设互通式立交和连接线。高速公路于 2021 年 3 月进场施工。因便道和隧道施工开挖，在唐家沟形成了 2 处弃渣堆积区(图 2b)。2021 年 9 月发现弃渣体及部分区域斜坡滑动变形。受地表弃渣堆载及植被覆盖等因素影响，仅在后部的挡墙和局部的混凝土便道路面观察到变形迹象，详细滑坡变形特征缺失。

2　数据与方法

本文通过地表调查和地质勘探研究滑坡区工程地质条件。基于多期无人机影像数据的对比分析，并结合大地测量和深部位移监测等方法研究滑坡变形特征。

2.1　数据获取

为研究滑坡变形特征，在滑坡发生前后的 2018—2022 年进行了多次地质调查和无人机影像数据采集(表 1)。各期无人机影像航向重叠不小于 70 %，旁向重叠不小于 50 %，影像分辨率见表 1。为了保证航拍数据解算后能够获得高精度的滑坡区域地形资料，在航拍前均布置了地面控制点(表 1)，地面控制点坐标采用 RTK

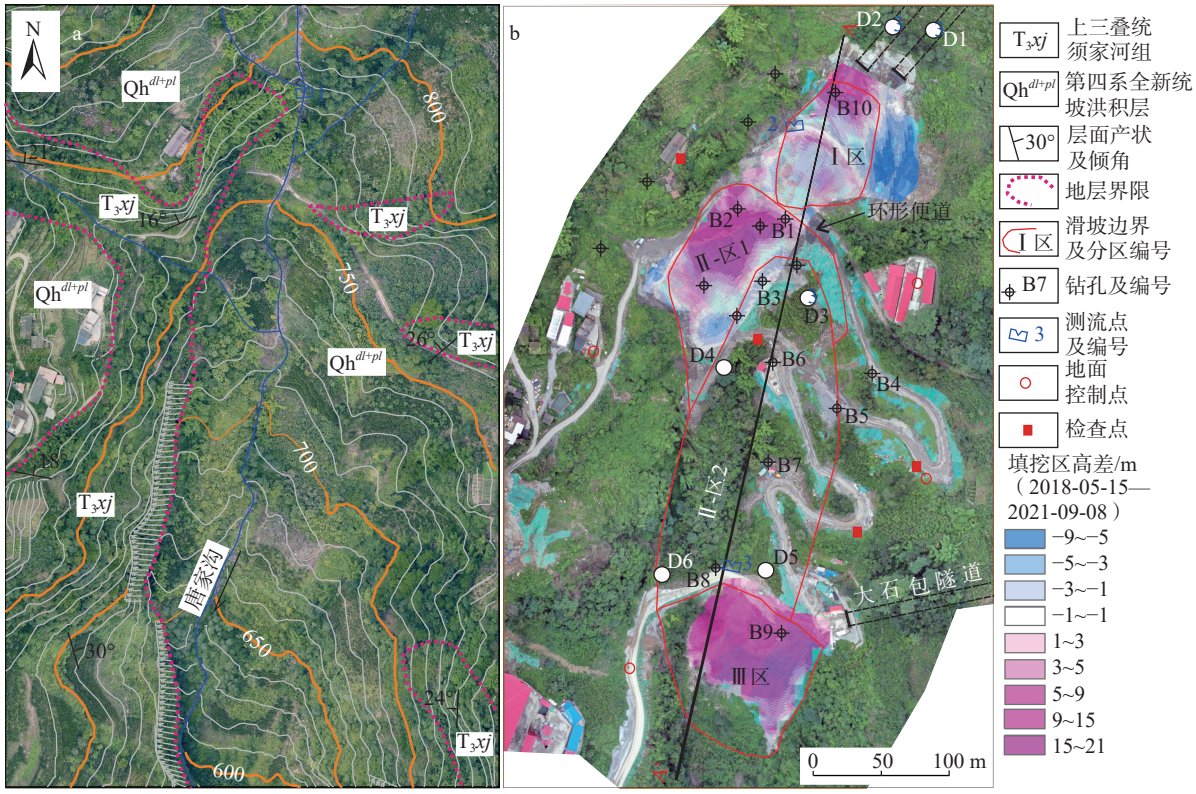

图 2　滑坡发生前后的影像图及滑坡分区图

Fig. 2　Images of pre- and post-sliding and zoning map of Tangjiawan landslide

测量，水平和高程精度分别为 2 cm 和 4 cm。采集无人机影像通过 Context Capture 软件进行处理生成数字正射影像图（DOM），数字高程模型（DEM）和三维数字模型。滑前地形采用 Optech eclipse 激光雷达获取。

表 1　数据汇总

Table 1　Summary of the data

阶段	使用设备	像控设置	影像分辨率/cm	获取日期
滑前	直升机搭载飞思相机（1亿像素）和Optech eclipse 激光雷达	沿线测绘地面控制点	<10	2018-05-15
	DJI Mavic2	勘察期间测绘控制点	<3	2019-03-26
滑后	DJI Mavic2	滑坡周边4个地面控制点	<3	2021-06-06
	DJI Mavic2		<3	2021-09-08
	DJI Mavic2		<3	2021-11-03
	DJI Mavic2		<3	2022-01-03

为分析滑坡地质结构和岩土特性，除利用滑坡发生前工程区钻孔外，滑坡发生后在滑坡区域布置了 9 个勘探钻孔（B1—B9），钻孔采用双管单动取芯工艺，采取原状岩芯样品。钻孔中选取代表性样品进行室内物理力学性质试验。钻孔完成后选取 5 个钻孔安装了深部位移监测管，进行深部位移监测（图 2b 中钻孔 B3、B5—B8）。其中 B3、B5 和 B6 测斜管安装后因滑坡变形或施工破坏未能观测；B7 和 B8 测斜孔观测时间段分别为 2021 年 11 月 18—22 日和 2021 年 11 月 12—29 日，之后因测斜管导轨无法下放而停止观测。

滑坡发生后布置了 6 个地表变形监测点（D1—D6）（图 2b），自 2021 年 9 月 22 日开始采用 RTK 进行监测。其中 2 个监测点位于滑坡区外（D1 和 D2）；4 个监测点（D3—D6）位于滑坡区内。2021 年 9 月 22 日至 2021 年 11 月 13 日连续观测，之后因施工干扰暂停，2022 年 1 月 13 日恢复观测（D3、D4 被破坏）。

2.2　数据处理分析

地表变形监测通常采用大地测量、GNSS、裂缝计等监测手段，但受数量限制很难覆盖大范围区域。基于多期无人机 DOM 影像对比分析的滑坡变形分析方法，已被国内外学者广泛采用。例如 Peternel 等[10]、Laribi 等[11]、Cheng 等[12]研究表明采用多期无人机影像对比分析采集滑坡变形数据价格低廉且能获取大量变形信息，监测点平面坐标精度可达 5 ~ 10 cm。本文研究中将相邻的两期 DOM 数据作为一个观测周期，在 DOM 影像上选取标志点作为监测点，通过对比两期影像上监测点坐标位置的变化，取得监测点的平面位移矢量。标志点主要选择影像上易于识别的块石角点、建筑物拐点、道路防护栏支撑柱等。通过 6 期 DOM 数据的对比，形成 5 个观测周期，各周期采集观测点数量见表 2。

表 2　各观测周期的观测时长和监测点数量

Table 2　Observation period duration and number of monitoring points for each observation period

观测期	起止日期	时间间隔/d	监测点数量/个
1	2018-05-15—2019-03-26	325	17
2	2019-03-26—2021-06-06	803	7
3	2021-06-06—2021-09-08	94	25
4	2021-09-08—2021-11-03	56	68
5	2021-11-03—2022-01-03	61	49

为估算基于 DOM 数据采集监测点的精度，在 2021 年 9 月 8 日影像采集时设置了检查点，检查点均匀分布在研究区域，共设置了 7 个检查点（图 2b，部分检查点和地面控制点位于该图幅外）。采用 RTK 测量检查点坐标，并在 DOM 上读取点位坐标。通过 RTK 测量坐标与 DOM 上读取的坐标数据对比，按照下式计算检查点中误差 *RMSE*：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2} \tag{1}$$

式中：y_i——DOM 影像上读取坐标；

x_i——RTK 测量坐标；

N——检查点数量。

计算得到检查点中误差为 0.04 m。根据监测点平面精度并参考 Peternel 等[10]相关研究，笔者将基于相邻 DOM 影像对比得到位移矢量大于 10 cm 的认为是监测点产生了显著位移。

3　滑坡基本特征及分区

唐家湾滑坡近似呈长条形（图 1、图 2），滑坡纵向长度约 480 m，横向宽度约 110 m，滑坡后缘高程约 786 m，滑坡前缘高程约 600 m，前后缘高差约 186 m。地质钻探及深部位移监测揭示滑体最大厚度约 29 m，估算滑坡体积约 66×10^4 m^3。根据滑坡地形地质特征，划分为 3 个分区：I 区、II 区和 III 区（图 2b）。

I 区位于清平隧道出口和环形便道之间（图 2b），面积 5 280 m^2。根据工程建设前（2018 年 5 月）和滑坡发生后（2021 年 9 月 8 日）的 DEM 数据对比绘制了填挖区的范围和厚度（图 2b）。受沟谷地形影响，弃渣区厚度差异较大，后部隧道施工平台附近厚度达 11.2 m，向前厚度逐渐减小（图 2b、图 3）。滑坡后缘位于隧道施工平台前缘，滑坡剪出口位于环形便道附近。滑坡左侧、右侧及前缘左侧见三叠系须家河组基岩出露。I 区主要为弃渣堆积体沿填筑界面滑动，厚度一般小于 7 m，为

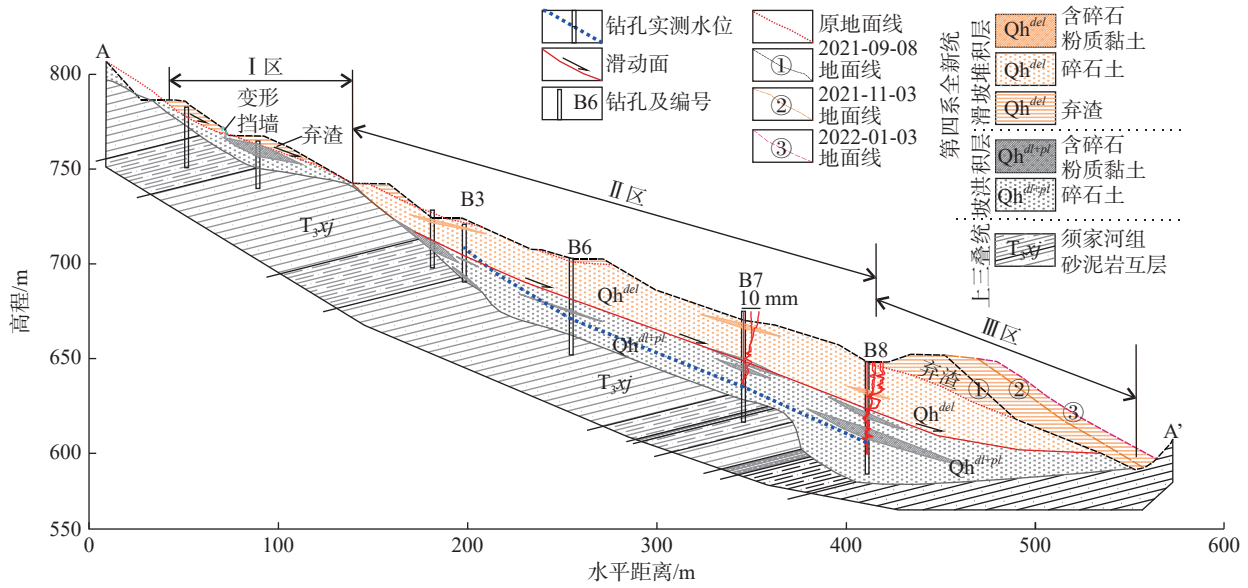

图 3 滑坡剖面图(图 2b 中 A-A')

Fig. 3 Longitudinal profile of the landslide (section A-A' in Fig. 2b)

浅层滑坡,是独立于 II 区和 III 区的滑移区。

II 区进一步划分为 II-1 区和 II-2 区。II-1 区为 II 区后缘的弃方堆载区,面积约 8 520 m^2,最大堆载厚度 18.7 m(图 2b)。II-2 区为唐家湾滑坡的主滑体,面积约 2.46×10^4 m^2。B6 和 B7 钻孔揭示覆盖层厚度分别为 40.5 m 和 48.5 m(图 3)。土层主要为碎石土,结构不均,石质成分以砂岩、粉砂岩等为主,与斜坡基岩岩性一致,为崩坡积和水流搬运后堆积形成。土层中局部夹有透镜状含碎石粉质黏土夹层(图 3、图 4),较厚的粉质黏土层中部呈硬塑状,而土层顶部和较薄的粉质黏土夹层多呈软塑—可塑状。碎石土透水性较好,易于地表水的下渗,而较厚的粉质粘土层形成坡体中相对隔水层,其顶部受地下水影响呈软塑—可塑状。

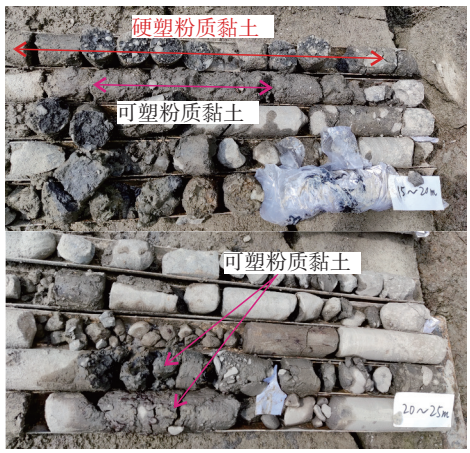

图 4 典型岩芯照片

Fig. 4 Typical drilling core sample photos

钻探施工和测斜管埋设在 2021 年 9—10 月,正值滑坡变形期间。钻孔勘探及深部位移监测较好的揭示了滑带的位置。在钻孔 B3 的 16.2 ~ 18.7 m段钻进过程中起钻和下钻困难。B3 钻孔和 B6 钻孔测斜管埋设完成后,分别在 16.6 m 和 21.5 m 处剪断,导致测斜仪探头无法沿导轨下放。在钻孔 B7 和钻孔 B8 测斜管安装完成后,监测表明滑带分别在 25.5 ~ 26.0 m 和 24.5 ~ 25.0 m 处(图 3),之后由于滑带变形过大测斜仪探头无法下放终止测量。深部位移监测表明滑坡的滑带发生在碎石土中部,部分滑带位于透镜状粉质黏土夹层附近(B7 和 B8),表明了土体中软弱夹层对滑坡的影响。

滑坡所在唐家沟溪沟地表水流量较小,2019 年 5 月 18 日图 2a 中 1 号点实测流量 0.35 L/s;2021 年 10 月 15 日图 2b 中 2 号点和 3 号点实测流量分别为 0.49 L/s 和 0.35 L/s。滑坡区钻孔地下水位监测表明稳定地下水水位埋深较大,滑坡中前部地下水水位远低于滑动面,仅在后部略高于滑动面(图 3)。场地碎石土渗透性较好,易于地表水的下渗,致使场地地下水水位埋深较大。但受土层中局部隔水层(透镜状粉质黏土夹层)影响,局部可能有上层滞水分布。

根据施工前(2018 年 5 月)和施工后(2021-09-08)DEM 数据的对比分析,I 区和 II-1 区的弃渣量分别为 1.57×10^4 m^3 和 2.94×10^4 m^3。III 区为滑坡前缘堆载区,主要为大石包隧道工程弃渣,自 2021 年 3 月隧道进洞施工后持续弃渣堆积,弃渣体面积和体积逐步增大(图 3、图 5)。通过多期无人机 DEM 数据分析,至 2021

年 9 月、2021 年 11 月、2022 年 1 月 III 区的弃渣堆积体积分别为 4.82×10^4, 9.50×10^4, 14.49×10^4 m^3。

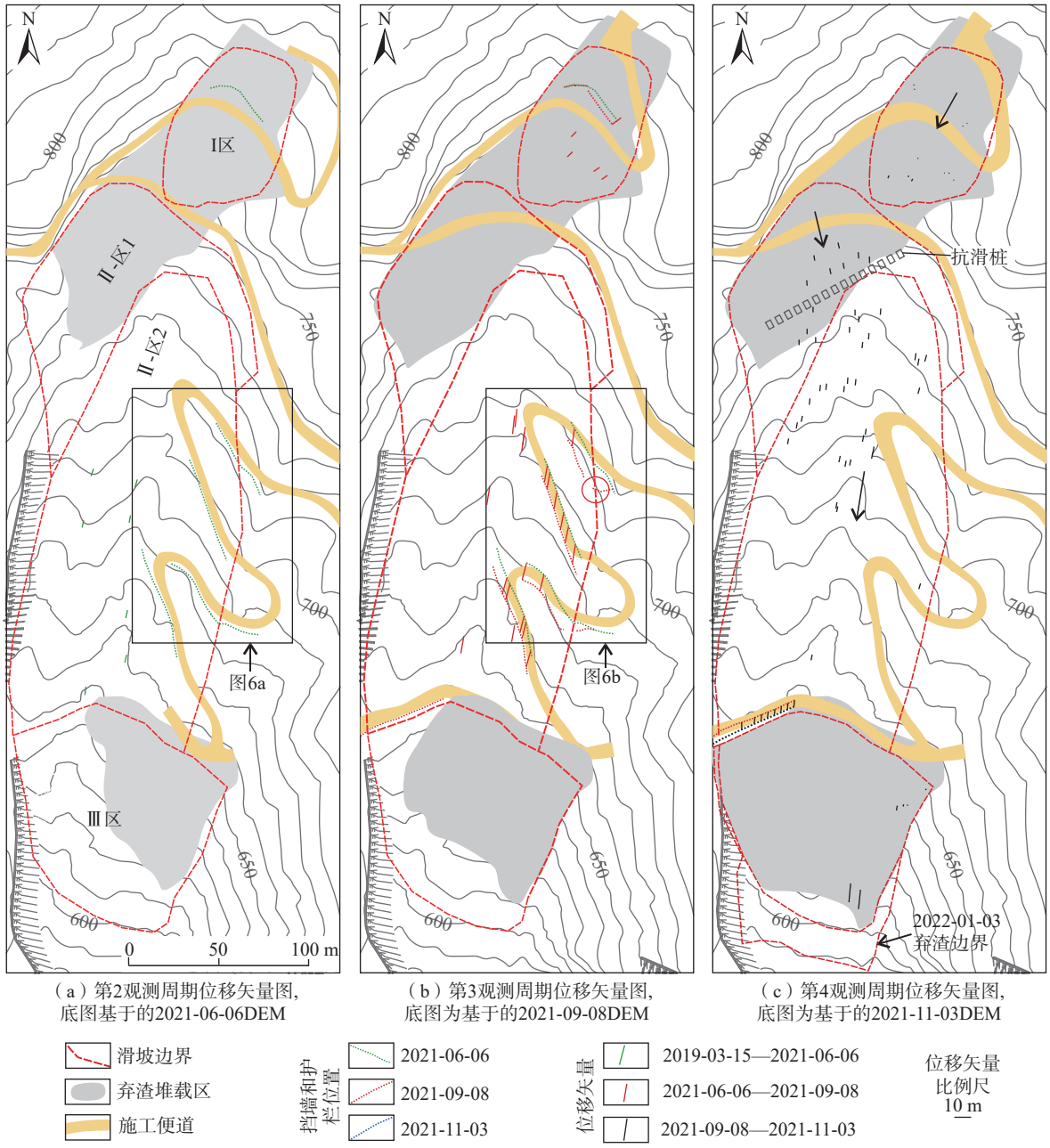

图 5　基于相邻两期 DOM 对比得出的各观测周期位移矢量图

Fig. 5　Displacement vector maps for each observation period based on comparison of consecutive DOM

4　滑坡变形特征

基于 6 期无人机影像数据分析，得到滑坡区各期监测点变形矢量见图 5，数据汇总见表 3。

4.1　滑坡滑前变形特征

基于研究区工程施工前的 DOM 影像（2018 年 5 月 15 日和 2019 年 3 月 26 日），作为第 1 个观测周期。通过影像对比，共识别出 17 个监测点，变形量为 0.01 ~ 0.18 m，平均值为 0.07 m，其中仅一个点大于 0.1 m。根据本文 2.2 节的精度评估，第一个观测周期（325 d），基于无人机 DOM 影像对比分析得到监测点平面位置变形量小于 10 cm，认为监测点无明显变形。

很多蠕变变形的滑坡具有较低的变形速率，有些甚至能够达到 cm/a 甚至 mm/a[13]，然而蠕变变形的滑坡在地貌上多会表现出波浪状地貌、拉裂缝、田坎变形等特征[12－14]。2019 年 3 月至 2019 年 10 月工程地质勘探期

表 3 各监测周期监测点平均变形量及变形速率

Table 3 Average displacement vectors and average deformation rates of monitoring points for each monitoring period

分区	数据类型	第1观测期（2018-05-15—2019-03-26）	第2观测期（2019-03-26—2021-06-06）	第3观测期（2021-06-06—2021-09-08）	第4观测期（2021-09-08—2021-11-03）	第5观测期（2021-11-03—2022-01-03）
I区	平均变形量/m	<0.1	—	3.8	0.7	—
	平均变形速率/(mm·d^{-1})	0	—	40.4	12.5	—
II-1区	变形量平均值/m	<0.1	—	—	3.2	0.140
	平均变形速率/(mm·d^{-1})	0	—	—	57.1	0.002
II-2区	变形量平均值/m	<0.1	4.4	9.7	3.5	0.090
	平均变形速率/(mm·d^{-1})	0	53.0	103.2	62.5	0

注：—标示该区内施工导致地形变化，无法取得匹配监测点；第2观测周期变形速率计算起始时间为工程开始施工的2021年3月15日。

间对滑坡所在区的地表调查和当地居民的访问未见地表变形迹象。2018 年 5 月和 2019 年 3 月的 DOM 影像上，田坎等线性影像特征明显，无蠕变型滑坡的波浪状地貌特征[15－16]。

综合第 1 期监测结果，以及勘察期间调查访问及影像分析，可以判定滑坡所在区域在工程施工前无变形现象，处于稳定状态。

4.2 滑坡滑后变形特征

滑坡滑后变形特征主要基于研究区工程施工前后的 5 期 DOM 影像，形成 4 个观测周期。

（1）第 2 个观测周期（2019-03-26—2021-06-06）：工程区 2021 年 3 月开始施工，在 2021 年 6 月 6 日 DOM 上，可见滑坡区域的后缘和左侧修建了便道，在滑坡的后缘和前缘开始进行弃渣，见图 5(a)。弃渣堆积区无法匹配监测点，仅在 II-2 区识别 7 个监测点，其变形量为 4.2 ~ 4.7 m，平均值为 4.4 m；位移矢量方位角 186.9 ~ 199.8°，平均值为 193.3°。可见工程施工弃渣堆载后，滑坡区即出现了滑移变形现象。2021 年 6 月 6 日的无人机影像上，可以清晰见到滑坡左侧边界附近的剪切裂缝，以及施工便道护栏被剪断的现象（图 6a）。

（2）第 3 个观测周期（2021-06-06—2021-09-08）：I 区弃渣堆载结束，II-1 区和 III 区继续弃渣堆载。该观测周期共识别 25 个观测点，其中 I 区 5 个，II 区 20 个，见图 5(b)。

I 区监测点变形量为 3.3 ~ 4.1 m，平均值为 3.8 m；位移矢量方位角 225.2° ~ 236.6°，平均值为 230.8°。图 5(b) 可见 I 区位移矢量主要指向临空面方向，与 II 有明显的差异，也说明了 I 区是一个相对独立滑动的区域。在 I 区中部可见挡墙被剪断，错断量约 2.8 m，表明该区不同位置变形量有一定差异。

II 区监测点变形量为 9.2 ~ 10.7 m，平均值为 9.7 m；位移矢量方位角 186.6° ~ 196.1°，平均值为 191.6°，位移矢量方向主要指向冲沟下游方向。II 区纵向长度约 260 m，前后监测点的变形量和方位角均较为接近，显示滑坡整体向前滑动的特征。滑体的滑动在滑坡边界形成了明显的剪切带，图 6b 可见自 2021 年 6 月 6 日至 2021 年 9 月 8 日，滑坡左侧的便道和便道护栏因滑体滑动而形成明显的剪切错动带。剪切错动带宽度约 5.6 m，第 2 观测周期内错动距离约 10 m，与滑体的滑动距离基本一致。对比图 6a 和 b，可清晰见到因滑体滑动导致地表建筑物、便道和便道护栏平面位置变化的情况。

（3）第 4 个观测周期（2021-09-08—2021-11-03），滑坡后缘的 I 区和 II-1 区弃渣结束，前缘的 III 区继续弃渣，共识别 68 个观测点。

I 区 11 个监测点，变形量由后向前逐渐增大，其中后部的挡墙位置变形量为 0.4 ~ 0.6 m，前部的变形量为 0.4 ~ 1.6 m，不同位置变形量差异较大。前部变形较大的原因可能受便道通行的重型车辆加载和震动所致。

II-1 区共识别 11 个监测点，其变形量为 3.0 ~ 3.6 m，平均值为 3.2 m；位移矢量方位角为 170.5° ~ 180.5°，平均值为 176.3°，位移矢量方向主要指向临空面的方向。II-2 区共识别 40 个监测点，除左侧边界附近 2 个点变形量较小外（0.4 ~ 0.8 m），其余 32 个点位移量为 3.2 ~ 4.3 m，平均值为 3.5 m；位移矢量方位角为 179.4° ~ 197.2°，平均值为 187.7°，与第 3 观测周期位移矢量方向基本一致。II-1 区和 II-2 区变形矢量方向略有不同，主要受 II-1 区斜坡临空面方向的影响，但两个分区变形量基本接近，表明了后缘加载作用下，滑体整体下滑的特征。第 4 观测周期内左侧便道重新修建，无法观测到边界附近变形的变化。

III 区持续弃渣，III 区左侧识别 6 个监测点，其变形表现为由后部的 0.8 m 向前逐渐增大至 10.8 m，表明弃渣体不同部位变形差异较大，见图 5(c)。

（4）第 5 个观测周期（2021-11-03—2022-01-03），滑

图 6　滑坡左侧边界对比图

Fig. 6　Comparison images of the left boundary of the landslide

坡区共识别 49 个监测点。

II-1 区（弃渣加载区）的 10 个监测点平均变形量 0.14 m，II-2 区的 36 个监测点平均变形量 0.09 m，表明该观测周期内滑坡地表变形量大幅减小，变形速率趋于 0。III 区弃渣堆积体由于持续弃渣，仅左侧边界附近识别 3 个点，其变形量为 0.25 ~ 1.08 m。

根据第 2 观测周期至第 5 观测周期的监测结果，滑坡后缘附近弃渣后滑坡区域开始出现明显变形迹象，以开始施工的 2021 年 3 月开始计算，第 2、3、4 观测周期主滑区（II 区）的平均变形速率为 53.0, 103.2, 62.5 mm/d，呈现先增大后减小的趋势，至第 5 观测周期，变形速率趋于 0。滑坡区变形速率的变化与工程弃渣堆载密切相关，也与降雨量的变化有一定关系，在本文第 5 节“滑坡成因分析”中讨论。

图 7 为滑坡区 4 个地表变形监测点（位置见图 2b）的变形—时间曲线，2021 年 9 月 22 日—10 月 15 日间平均变形速率 83.7 mm/d，2021 年 10 月 15 日—11 月 03 日间平均变形速率减缓 9.9 mm/d，2021 年 11 月 3 日至 2022 年 1 月 3 日，D5 和 D6 两个点平均变形量仅 54 mm，之后至 2022 年 5 月 8 日均无明显变形。对比如上基于 DOM 影像的第 5 期分析结果与地表变形监测点（D5 和 D6）监测结果基本一致，验证了多期无人机影像对比分析得出地表变形监测结果的可靠性。

本文通过研究区工程建设前后 3 年多共 6 期无人机影像的对比分析，得出了研究区的地表变形特征。结果表明利用无人机高清影像比对的方法可实现大范

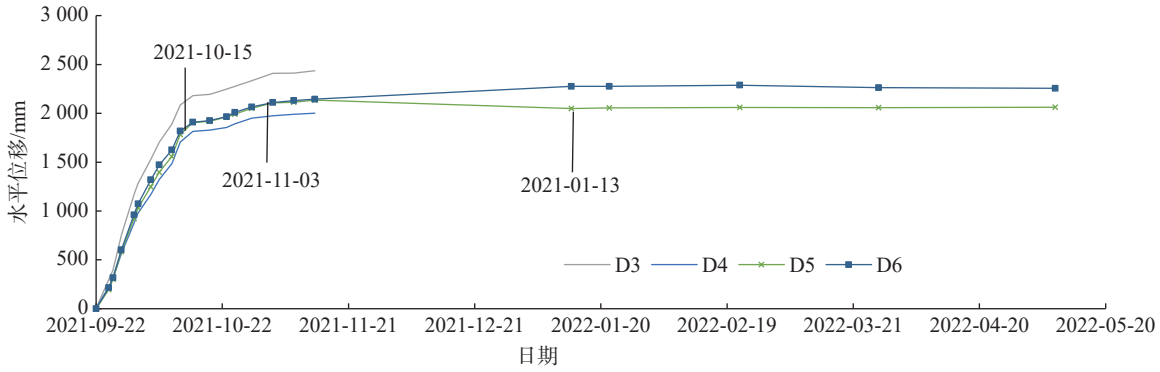

图 7　地表变形监测点时间—水平位移曲线

Fig. 7　Time-horizontal displacement curves for surface deformation monitoring points

围、非接触的变形监测，从而获取研究区域工程建设前后的地表变形信息。但植被覆盖较大的段落难以捕捉监测点，如图 2 中滑坡右侧植被密集区域未能识别监测点。同时，无人机采集影像数据受时间间隔限制，不能采集连续变形数据，不能准确捕捉图 7 所示的变形“拐点”，实际滑坡监测中可与传统大地测量等方法相结合，互为补充[17－19]。

5 滑坡成因分析

工程开挖和填筑加载是诱发滑坡灾害发生的重要因素。唐家湾滑坡后缘的弃渣堆载区地面横坡坡度和岩土界面倾角分别在 32°和 40°(图 3)。自 2021 年 3 月开始在滑坡后缘的(I 区和 II-1 区)弃渣堆载，属于在坡体最不利部位加载。后缘堆载增大了坡体的下滑力，不利于坡体的稳定。弃渣堆载后滑坡区出现变形并不断发展，表明弃渣堆载是诱发滑坡发生和变形不断发展的直接因素。然而滑坡后缘堆载量仅 4.51×10^4 m^3，触发中前部近 20 ~ 30 m 厚土体滑动，也与滑坡所处的地形地质条件和降雨密切相关。

图 1 可见滑坡区位于唐家沟中游沟床纵坡相对平缓部位。唐家沟上游区为环状汇水地貌，地质构造上位于周家坪向斜轴部附近，岩性主要为砂岩、粉砂岩和泥岩互层，不同岩性层差异风化显著，受构造影响岩体破碎。陡坡岩体在长期风化和重力作用下不断变形失稳，在中游相对缓坡段堆积，形成深厚覆盖土层(图 3)。堆积土层以块、碎石土为主，透水性好，易于地表水下渗。而土层中夹有透镜状含碎石粉质黏土层，具有含水率低、透水性差、遇水易软化的特点，形成局部的隔水层和软弱层(图 3、图 4)，易于成为滑坡滑动的边界面。因此，特殊的地形地质条件是滑坡易于形成的地质基础。

同时，弃渣堆载主要在 2021 年的 3 月至 9 月，正值雨季。根据距离滑坡区 2.2 km 的清平乡气象站观测资料，2021 年累计降雨量为 1 008.9 mm，其中 3—9 月的累计降雨量为 906.5 mm，占全年降雨量的 90%(图 8)。因此 2021 年 3 月弃渣堆载后，致使坡体变形开裂，从而更有利于地表降水向坡体深部渗透。弃渣堆载期与雨季叠加，持续降雨入渗不仅增大土体重度从而增大下滑力，还造成土体抗剪强度降低，也是促进滑坡变形发展的重要因素。图 8 可见在第 3 观测周期(2021-06-06—2021-09-08)变形速率最高，与该时间段内降雨量最大(累计 594 mm，占全年 58.9%)表现出了相关性。而地表变形观测点 D5 和 D6 在 2021 年 9 月 22 日开始观测后，变形速率波动性降低，2021 年 10 月 15 日后变形速率明显降低，和降雨的逐步减少有一定关系[20－21]。

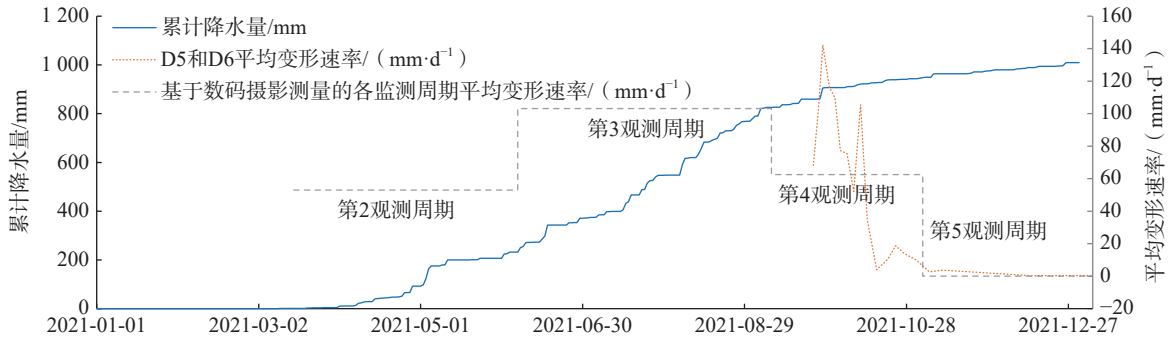

图 8 累计日降水量与平均变形速率

Fig. 8 Cumulative daily precipitation and average deformation rates

滑坡前缘的 III 区持续弃渣堆载，对滑坡的变形也有较大的影响。虽然 III 区在斜坡上堆载，自身也出现滑移变形。但 III 区持续弃渣堆载对滑坡起到了一定的反压作用(图 3、图 5)。尤其是在 2021 年 11 月以后，随着弃渣量的增大，弃渣体覆盖了冲沟并掩埋了部分滑坡右侧的基岩陡壁，形成了滑坡体前缘的反压，从而增大了抗滑力，从而使滑坡的滑动速率降低。

基于本文滑坡变形特征和形成机理的分析，滑坡防治采用在后缘堆载区前缘设置抗滑桩，见图 5(c)，以消除后缘弃渣体对滑坡的加载作用，并设置地表截排水措施减小地表水入渗的不利影响。2022 年 3 月滑坡治理工程逐步实施，滑坡区域趋于稳定，2022 年未见明显变形。

6 结论与认识

(1) 基于多期无人机影像生成的 DOM 数据，匹配相邻两期 DOM 影像特征点作为地表变形监测点，可通过监测点平面位置的变化提取变形矢量数据，从而实现滑坡区非接触式的地表变形监测。

（2）唐家湾滑坡位于新市—金阳高速公路清平互通工程建设区。滑坡区工程建设前的自然斜坡无明显变形。唐家湾滑坡区工程弃渣后，主滑区开始出现明显变形迹象，基于无人机数码摄影测量得到第 2 观测周期（2021-03-15—2021-06-06）、第 3 观测周期（2021-06-06—2021-09-08）和第 4 观测周期（2021-09-08—2021-11-03）滑坡主滑区平均变形速率分别为 53.0, 103.2, 62.5 mm/d，之后变形速率趋于 0。

（3）弃渣堆载是唐家湾滑坡发生的直接触发因素，滑坡区特殊的地形地质条件和降雨也是滑坡变形持续发展的重要因素。受构造、岩性和地貌影响，滑坡区域堆积了厚度超过 40 m 的碎石土层，土层中夹透镜状含碎石粉质黏土夹层，形成坡体中的软弱层，易发展为滑动面。厚层碎石土有利于地表水的入渗，而弃渣堆载区叠加雨季，促进了滑坡变形的持续发展。

（4）基于无人机数码摄影测量可低成本获得长时序、大范围滑坡运动特征数据，可作为一种有效的、安全的滑坡变形监测手段，为滑坡机理分析和防治措施研究提供依据。但易受采样间隔和地表植被覆盖限制，不能准确捕捉变形“拐点”，植被茂密区难以采集监测数据，可与其他方法相结合、互为补充。

参考文献（References）：

［1］ 贾会会，薛建志，郭利召，等. “空天地”一体化技术在采空区形变监测中的应用［J］. 中国地质灾害与防治学报，2023, 34(3)：69－82.［JIA Huihui, XUE Jianzhi, GUO Lizhao, et al. Application of combined space, arial and ground based multiple technologies in deformation monitoring of mining areas［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3)：69－82.（in Chinese with English abstract）］

［2］ 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考［J］. 工程地质学报，2020, 28(2)：360－374.［XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: Consideration to practical issues［J］. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2)：360－374.（in Chinese with English abstract）］

［3］ 刘春，万红，李巍岳，等. 基于无人机影像的大型滑坡区域精细地形构建研究［J］. 井冈山大学学报（自然科学版），2015, 36(1)：1－7.［LIU Chun, WAN Hong, LI Weiyue, et al. The research on construction of large-scale landslide precise terrain based on uav images［J］. Journal of Jinggangshan University（Natural Science）, 2015, 36(1)：1－7.（in Chinese with English abstract）］

［4］ 王俊豪，魏云杰，梅傲霜，等. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡信息多维提取与应用分析［J］. 中国地质，2021, 48(2)：388－401.［WANG Junhao, WEI Yunjie, MEI Aoshuang, et al. Multidimensional extraction of UAV tilt photography-based information of loess landslide and its application［J］. Geology in China, 2021, 48(2)：388－401.（in Chinese with English abstract）］

［5］ 孔嘉旭，谷天峰，孙萍萍，等. 基于多期无人机影像的黑方台硅化厂滑坡形态变形演化研究［J］. 干旱区资源与环境，2021, 35(1)：100－107.［KONG Jiaxu, GU Tianfeng, SUN Pingping, et al. Research on deformation evolution of landslides in Heifangtai silicified plant based on multi-stage UAV images［J］. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(1)：100－107.（in Chinese with English abstract）］

［6］ 彭大雷，许强，董秀军，等. 无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用［J］. 地球科学进展，2017, 32(3)：319－330.［PENG Dalei, XU Qiang, DONG Xiujun, et al. Application of unmanned aerial vehicles low-altitude photogrammetry in investigation and evaluation of loess landslide［J］. Advances in Earth Science, 2017, 32(3)：319－330.（in Chinese with English abstract）］

［7］ 张欢，巨能攀，陆渊，等. 基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析［J］. 水文地质工程地质，2021, 48(6)：171－179.［ZHANG Huan, JU Nengpan, LU Yuan, et al. Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6)：171－179.（in Chinese with English abstract）］

［8］ 陈巧，袁飞云，付霞，等. 无人机摄影测量技术在阿娘寨滑坡应急调查中的应用［J］. 测绘通报，2023(1)：77－83.［CHEN Qiao, YUAN Feiyun, FU Xia, et al. Application of unmanned aerial vehicle photogrammetry technology in emergency investigation of Aniangzhai landslide［J］. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(1)：77－83.（in Chinese with English abstract）］

［9］ 赵婷婷，高文娟，李志林，等. 实景三维技术在“8•8”九寨沟地震地质灾害快速调查中的应用［J］. 中国地质灾害与防治学报，2023, 34(3)：93－99.［ZHAO Tingting, GAO Wenjuan, LI Zhilin, et al. Application of real-scene 3D technology in the rapid survey of geological disasters after the “8•8” Jiuzhaigou earthquake［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3)：93－99.（in Chinese with English abstract）］

［10］ PETERNEL T, KUMELJ Š, OŠTIR K, et al. Monitoring the Potoška planina landslide（NW Slovenia）using UAV photogrammetry and tachymetric measurements［J］. Landslides, 2017, 14(1)：395－406.

［11］ LARIBI A, WALSTRA J, OUGRINE M, et al. Use of digital

photogrammetry for the study of unstable slopes in urban areas: Case study of the El Biar landslide, Algiers [J]. Engineering Geology, 2015, 187: 73 − 83.

[12] CHENG Qiang, YANG Yinghui, DU Yi. Failure mechanism and kinematics of the Tonghua landslide based on multidisciplinary pre- and post-failure data [J]. Landslides, 2021, 18(12): 3857 − 3874.

[13] SASAKI Y, FUJII A, ASAI K. Soil creep process and its role in debris slide generation: Field measurements on the north side of Tsukuba Mountain in Japan [J]. Developments in Geotechnical Engineering, 2000, 84: 199 − 219.

[14] REGMI N R, WALTER J I. Detailed mapping of shallow landslides in eastern Oklahoma and western Arkansas and potential triggering by Oklahoma earthquakes [J]. Geomorphology, 2020, 366: 106806.

[15] 张克利, 姚爱敏, 张建全, 等. GB-InSAR 滑坡应急监测的快速建模与三维匹配试验及应用 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 190 − 197. [ZHANG Keli, YAO Aimin, ZHANG Jianquan, et al. Rapid modeling and 3D matching of GB InSAR landslide emergency monitoring: Method and application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 190 − 197. (in Chinese with English abstract)]

[16] 黄永芳, 郭永刚, 黄艳婷. 基于加权信息量和加权确定性系数的藏东南滑坡易发性评价 [J]. 中国地质调查, 2024, 11(3): 108 − 116. [HUANG Yongfang, GUO Yonggang, HUANG Yanting. Landslide susceptibility assessment in the southeastern Tibet based on weighted informativeness and weighted certainty factor [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 108 − 116. (in Chinese with English abstract)]

[17] 岳磊, 刘昌义, 丛晓明, 等. 基于 InSAR 技术的夏藏滩滑坡区地表变形监测与分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 158 − 170. [YUE Lei, LIU Changyi, CONG Xiaoming, et al. Surficial deformation monitoring and analyzing to the Xiazangtan landslides based on InSAR method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 158 − 170. (in Chinese with English abstract)]

[18] 安雪莲, 密长林, 孙德亮, 等. 基于不同评价单元的三峡库区滑坡易发性对比——以重庆市云阳县为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1629 − 1644. [AN Xuelian, MI Changlin, SUN Deliang, et al. Comparison of landslide susceptibility in Three Gorges Reservoir area based on different evaluation units: Take Yunyang County in Chongqing as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1629 − 1644. (in Chinese with English abstract)]

[19] 薛强, 张茂省, 董英, 等. 基于 DEM 和遥感的黄土地质灾害精细化风险识别——以陕北黄土高原区米脂县为例 [J]. 中国地质, 2023, 50(3): 926 − 942. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, DONG Ying, et al. Refinement risk identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing: Taking Mizhi County in the Loess Plateau of northern Shaanxi as an example [J]. Geology in China, 2023, 50(3): 926 − 942. (in Chinese with English abstract)]

[20] 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)]

[21] 孙小勇, 魏龙, 唐华, 等. 基于 GIS 的崩滑地质灾害孕灾地质条件分析——以西藏嘉黎县为例 [J]. 中国地质调查, 2024, 11(4): 92 − 100. [SUN Xiaoyong, WEI Long, TANG Hua, et al. Analysis of the disaster-pregnancy geological conditions of collapse and landslide based on GIS: A case study of Jiali County in Tibet [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(4): 92 − 100. (in Chinese with English abstract)]