

西气东输管道工程陕西岭湾村滑坡变形特征及成因机制分析

王 子, 王 栋, 姜 帅, 李艳军, 安培源

Analysis on deformation mechanism of the Lingwan Village landslide in Shaanxi Province section of the West-East Gas Pipeline Project

WANG Zi, WANG Dong, JIANG Shuai, LI Yanjun, and AN Peiyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

融雪诱发黄土滑坡活动特征与应急响应模式——以新疆伊犁则克台滑坡为例

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

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

基于BA-LSSVM模型的黄土滑坡致灾范围预测

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

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

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制

The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion

成玉祥, 张卜平, 唐亚明 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 86-91

青海尖扎盆地寺门村滑坡发育特征及成因分析

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

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

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209012

王子, 王栋, 姜帅, 等. 西气东输管道工程陕西岭湾村滑坡变形特征及成因机制分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 8-19.

WANG Zi, WANG Dong, JIANG Shuai, et al. Analysis on deformation mechanism of the Lingwan Village landslide in Shaanxi Province section of the West-East Gas Pipeline Project[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 8-19.

西气东输管道工程陕西岭湾村滑坡变形特征 及成因机制分析

王子¹, 王栋², 姜帅³, 李艳军^{4,5}, 安培源⁵

(1. 国家管网集团西气东输公司, 上海 200120; 2. 揭阳揭东中石油昆仑天然气有限公司, 广东 揭阳 522000; 3. 国家管网集团北方管道公司, 河北 廊坊 065000; 4. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 5. 北京中地华安科技股份有限公司, 北京 100085)

摘要:以西气东输管道余家坪镇岭湾村一处正在变形的黄土滑坡为研究对象, 基于现场勘察、InSAR、GNSS 监测和深部位移监测等, 分析滑坡 2017—2022 年的变形特征及滑坡成因机制。研究表明: 滑坡地下水水位已达坡脚, 滑坡前缘形成多处“土溜”, 滑坡地表垂直潜蚀裂缝发育, 后缘可见贯通的裂缝, 滑坡内管道周边裂缝发育; InSAR 数据显示滑坡一直缓慢变形, 年变形量 2.0~4.0 cm; GNSS 变形及裂缝变形显示, 2020 年 8 月至今地表变形速率增大, 变形明显, 变形量在 4~10 cm; 深部位移监测数据变化量在 0.05~1.36 mm, 变化很小; 降雨及土体含水率数据分析表明滑坡在暴雨后发生位移变形。综合分析监测数据表明, 岭湾村滑坡属于降雨诱发的浅层滑坡; 区域内的自然强降雨、人类工程经济活动作为滑坡的诱发因素, 对滑坡的发生及发展作用明显。结合管道应变监测数据, 目前西气东输管道遭受滑坡灾害的风险可控。

关键词: 西气东输管道; 黄土滑坡; 变形特征; 成因机制; 诱发因素

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)03-0008-12

Analysis on deformation mechanism of the Lingwan Village landslide in Shaanxi Province section of the West-East Gas Pipeline Project

WANG Zi¹, WANG Dong², JIANG Shuai³, LI Yanjun^{4,5}, AN Peiyuan⁵

(1. PipeChina West East Gas Pipeline Company, Shanghai 200120, China; 2. Jieyang Jiedong Petro China Kunlun Gas Co. Ltd., Jieyang, Guangdong 522000, China; 3. PipeChina North Pipeline Company, Langfang, Hebei 065000, China; 4. School of Civil Engineering, Beijing Jiao Tong University, Beijing 100044, China; 5. Beijing Zhongdihuaan Technology Co. Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Based on field investigation, InSAR, GNSS monitoring, and deep displacement monitoring, a deformed loess landslide in Lingwan Village, Yujiaping Town, West-East Gas Pipeline Project was analyzed to understand its deformation characteristics and landslide formation mechanism from 2017 to 2022. The analysis shows that the groundwater level of the landslide has reached the toe of the slope, and numerous soil slips have been formed at the front edge of the landslide. The surface of the landslide exhibits vertical subsurface erosion cracks, while the penetrating cracks can be seen at the trailing edge.

收稿日期: 2022-09-18; 修订日期: 2023-02-02

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 王子(1984-), 男, 本科, 工程师, 主要从事管道完整性研究。E-mail: 275605586@qq.com

通讯作者: 李艳军(1984-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 21115070@bjtu.edu.cn

InSAR data shows that the landslide has been slowly deformed, with an annual deformation rate between 2.0 - 4.0 cm. GNSS deformation and crack deformation show that since August 2020, the surface deformation rate has increased significantly, with a deformation rate between 4.0 - 10.0 cm. The variation of deep deformation monitoring data is minimal, between 0.05 to 1.36 mm. Analysis of rainfall and soil moisture data shows that the landslide has displacement deformation after rainstorm. The comprehensive analysis of monitoring data reveals that the landslide in Lingwan Village is a shallow landslide induced by rainfall. Natural heavy rainfall and human engineering economic activities in the region are the primary inducing factors for the occurrence and development of landslide. Combined with pipeline strain monitoring data, the risk of landslide disasters in Shaanxi Province section of West-East Gas Pipeline Project is controllable.

Keywords: West-East Gas Pipeline; loess landslide; deformation characteristics; formation mechanism; induced factors

0 引言

西气东输工程作为国家西部大开发的标志性工程,于 2004 年底运营。西气东输管道途经我国新疆、甘肃等 9 个省、市、自治区,管道工程沿线地质环境条件复杂,西段、中段和东段地质灾害分布呈现区域性分布规律^[1-2]。西气东输干线甘-陕-晋段遭受滑坡灾害最为严重,自 2000 年以来,至少发生 32 起威胁管道安全的滑坡事件^[3]。该区段管道跨越黄土高原地区,黄土分布范围广,受黄土湿陷性等因素的影响,黄土斜坡地区的管道受滑坡灾害威胁严重,如发生滑坡灾害,极易造成管道周边水毁、坍塌、管道受拉等破坏,进一步引起管道失效,威胁管道运行安全。

陕北黄土高原区滑坡灾害发育,张茂省等^[4]基于西北黄土高原地质灾害详细调查成果,阐述了区域内黄土滑坡诱发因素分类及其形成机理;刘朋飞等^[5]通过延安地区的环境变迁分析滑坡分布特征,包括滑坡的特点、发育规律和滑坡发育分期。李艳杰等^[6]应用 SINMAP 模型分析了降雨引发的区域滑坡失稳面积变化,证明该模型在黄土地区,对区域性降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性的模拟预测有效,可以用于黄土地区浅层滑坡的稳定性评价研究。王新刚等^[7]通过室内黄土三轴蠕变试验手段,定量化分析研究了陕北榆林市色草湾黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变长期强度及长期强度折损率变化。前述研究从地质调查、环境演变、模型试验等方面阐述了区域内黄土滑坡的分布、发育规律、机理特点和风险评价方法,丰富了对区域黄土滑坡灾害的认识。然而,区域内的管道工程受黄土滑坡灾害的影响程度如何,则需要结合工程本身开展进一步的研究。

针对西气东输管道沿线地质灾害风险防控,在传统地质灾害调查评价、勘察、设计、工程治理基础上,管道运维机构同时运用大数据、物联网、云计算、人工智能等技术,构建了“空-天-地”一体化管道风险管控综合

系统,实时感知管道沿线地质灾害,建立智慧化、数字化管网监管平台,提高了输气管道地质灾害的风险技防水平^[8-10]。关于油气管道地质灾害风险管控,邹永胜等^[11]提出一种新的区域管道地质灾害监测预警体系,采用 Sentinel-1A、地表 GNSS 监测站和降雨量监测站为数据源,对发现的 82 处潜在风险区进行了为期 2 年的跟踪监测预警,取得了良好的试验效果。基于“空-天-地”一体化的监测手段和方法在滑坡灾害的变型监测和风险识别中得到不同程度的应用^[12-13],常规滑坡等地质灾害监测主要依赖 GNSS、深部位移监测等型成监测网,其特点是监测精度较高,能获得连续周期的数据,但监测成本较高,需要定期维护,且监测范围较小,而且难以从较长的时间揭示缓变型滑坡的形变特点。近年来发展起来的合成孔径雷达干涉测量^[14-15],可以获取大面积、全天候、高精度和高分辨率的地表三维空间微小变化,在滑坡形变监测方面显示出前所未有的优越性,已成为滑坡形变监测和灾害识别的重点手段。

目前,针对黄土覆盖区影响输气管道工程安全的滑坡变形特征、发育成因机理研究较少。因此,以西气东输管道陕西子长市余家坪镇岭湾村一处缓变型黄土滑坡为研究对象,采用 InSAR、GNSS 变形等监测方法、现场调查和勘察等技术手段,分析管道穿越区滑坡 2017—2022 年的变形特征,剖析黄土覆盖区管道滑坡的发育成因机理,为下一步输气管道滑坡灾害防治提供技术支撑。

1 工程地质概况

1.1 滑坡地质概况

研究区位于西气东输管道桩号 DD282 处,永坪河右岸的黄土斜坡。微地貌属黄土梁峁地貌,滑坡后缘高程为 1 081 m,前缘高程为 1 058 m,高差约 23 m,主滑方向约 58°,平均坡度 13°~15°,属于“V”型沟谷,西气东输管道从滑坡后缘通过(图 1—2)。区域内年均降水量

489.5 mm, 最大 769.6 mm。研究区地处华北陆台鄂尔多斯地台向斜东南翼斜坡带, 为陕北构造盆地的一部分。滑坡区及周边出露地层自老到新有三叠系延长统、侏罗系、白垩系保安统、古近系三趾马红土层及第四系。滑坡地层据钻孔揭露^[16-18], 主要为第四系全新统(Qh^{al+eol})及新近系上更新统冲积层(Qp^{eol})及三叠系

砂质泥岩(T₃l)(图 2)。滑坡范围约 280 m(南北)×160 m(东西), 顺主滑方向长约 140 m, 面积约 0.03 km², 滑体平均厚度约 11 m, 最大厚度约 25 m, 体积约 33×10⁴ m³。按照滑坡的体积划分, 属于中型黄土滑坡; 按照滑坡的厚度划分, 属于中层滑坡。

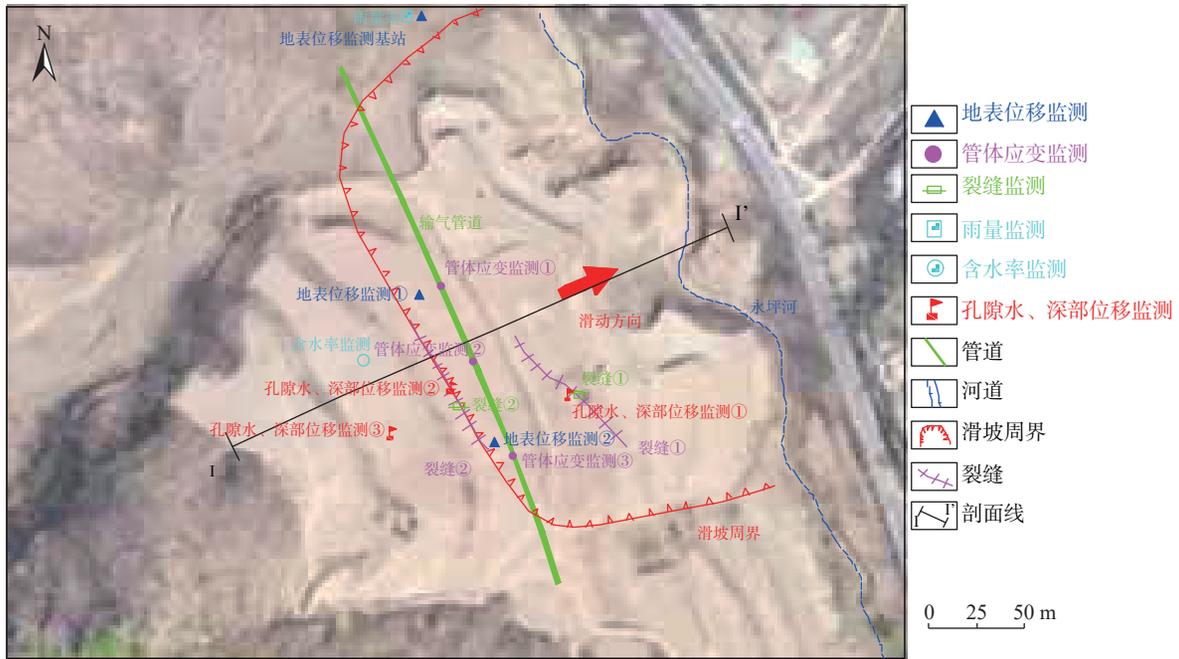


图 1 子长市岭湾村滑坡平面分布图

Fig. 1 Landslide location plane map of Lingwan Village, Zichang City

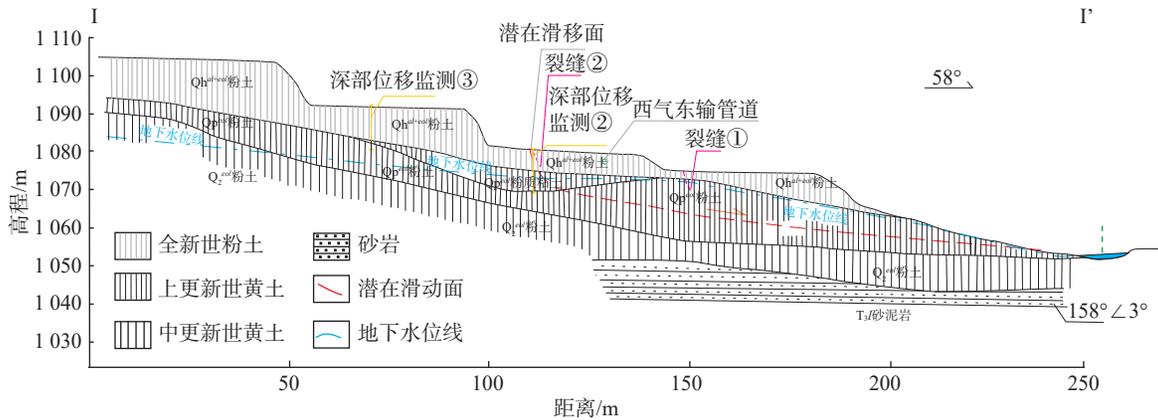


图 2 子长市岭湾村滑坡地质剖面图(I-I')

Fig. 2 Landslide geological cross-section profile of Lingwan Village, Zichang City(I-I')

滑坡后缘边界为坡体中部管道后侧位置, 裂缝与管道位于同一级平台, 与管道最大间距约 21 m, 在平面上形态大致呈圆弧形; 滑坡前缘剪出口位于坡体底部永坪河右岸边界, 剪出口未见明显前缘反翘或鼓丘; 滑坡北侧侧缘边界位于坡体内侧 10 ~ 50 m, 滑坡内外地

层未见明显高差; 滑坡南侧侧缘边界位于坡体内侧 10 ~ 50 m。

滑坡区地下水主要为黄土孔洞裂隙水, 据钻孔揭示稳定地下水埋深为 0.7 ~ 21.0 m, 坡脚地下水埋深最浅为 0.7 m, 向坡顶方向地下水埋深不断增加, 最深达

21.0 m。高程 1 058.8 ~ 1 083.7 m。地下水位年变化幅度在 1.5 ~ 2.5 m, 地下水位的变化主要受大气降水、河流、水利设施的入渗及灌溉的影响^[10-11]。

1.2 数据来源

1.2.1 InSAR 数据

本次研究利用覆盖滑坡区的 92 景 Sentinel-1A 影像, 基于 PS-InSAR 算法, 反演地表形变信息。首先对 InSAR 数据进行处理, 处理流程包括: ①监测区域影像选择与主从影像对配准; ②差分干涉图生成; ③PS 选定; ④平均变形速率估计和地形误差消除; ⑤PS 点变形时间序列分析与平均变形估算等。之后, 通过对子长市岭湾村滑坡 2017 年 3 月至 2020 年 4 月间所有卫星影像进行分析, 应用 InSAR 获取滑坡区及周边的年平均沉降速率分布。同时, 基于 Kriging 插值法将点状结果拟合生成研究区年平均沉降速率拟合图。

1.2.2 地表位移、深部裂缝等数据

地表位移监测采用一体化 GNSS 监测站, 监测技术的原理是利用 GPS/BDS、GLONASS 卫星测量基准站

和监测点之间的相对定位得到各监测点不同时期的位置信息, 然后利用数据处理软件对位置信息进行解算分析, 剔除各种环境影响误差因子, 并与首次测量的数据进行对比, 得到不同监测点在监测周期内基于时间序列的位置变化信息(精确至 mm)。深部位移采用一体化固定式钻孔测斜仪监测获得, 在测斜管内不同高程安装倾斜传感器, 可获取滑坡内不同高程的水平位移状态。可以实现远程遥测, 并可准确而连续地监测灾害体内部的变形情况。地表裂缝监测采用一体化裂缝计, 监测滑坡后缘裂缝的变化情况, 进行触发式动态监测。地下水位及孔隙水压力监测采用一体化透气型渗压计监测, 与深部位移监测同位置安装。上述监测站点均采用 4G 蜂窝网络通讯方式进行实时数据传输。现场采集数据最终展示在地质灾害监测系统平台上, 当监测值超过预警值时发出警报, 以短信的形式通知管道运行管理人员。

子长市岭湾村滑坡监测工作于 2019 年完成, 监测点布置及监测内容见表 1, 主要监测设备参数见表 2, 监测点分布见图 1。

表 1 子长市岭湾村滑坡监测点布置情况

Table 1 Summary of landslide monitoring points in Lingwan Village, Zichang City

输气管道	监测点位置	监测要素	安装月份
西气东输管道	子长市余家坪镇岭湾村	雨量(1个)、裂缝(2个)、孔隙水压力(3个)、位移(3个)、深部位移(3个)、含水率(3个)、应变计(3个截面)	2019年12月

表 2 主要监测设备参数

Table 2 Main monitoring equipment parameters

序号	监测要素	监测设备	参数指标
1	地表位移监测	一体化GNSS形变自动监测站	一体化GNSS形变自动监测站全星座支持; 精度平面: $\pm(2.5 \text{ mm} + 0.5 \times 10^{-6} \text{ D})$, 高程: $\pm(5 \text{ mm} + 0.5 \times 10^{-6} \text{ D})$
2	深部位移监测	一体化深部测斜监测站	量程: $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$; 测量精度: $\pm 0.1\% \text{ FS}$; 长期稳定性: $\pm 0.25\% \text{ FS}/\text{年}$; 分辨率: $\pm 10 \text{ 弧秒} (\pm 0.05 \text{ mm}/\text{m})$
3	地表裂缝监测	一体化表面裂缝自动监测站	测量范围: 0 ~ 5 000 mm; 测量方向: 双向; 测量精度: $\pm 0.1\% \text{ mmFS}$; 拉线材质: 纲钢丝
4	地下水位监测	测压管及透气型渗压计	量程: 35 m; 精度等级: $\pm 0.05 \sim \pm 0.2\% \text{ FS}$; 非线性度: $\pm 0.1 \sim \pm 0.2\% \text{ FS}$

2 滑坡变形特征

2.1 InSAR 数据分析

利用 2017 年 3 月至 2020 年 4 月间卫星影像数据, 应用 InSAR 进行分析, 绘制滑坡区及周边区域年平均沉降速率分布(图 3)。为能够更直观和清楚地反映出研究区地面沉降的时空分布趋势, 基于 Kriging 插值法将点状结果拟合生成沉降趋势面, 拟合的平均沉降速率见图 4。研究区沉降量较大, 最大可达 36.54 mm/a。

采用 DS-InSAR 技术监测到岭湾村滑坡的沉降异常, 该滑坡附近存在 22 个 PS 点, 且较均匀分布在该滑坡内(图 5)。

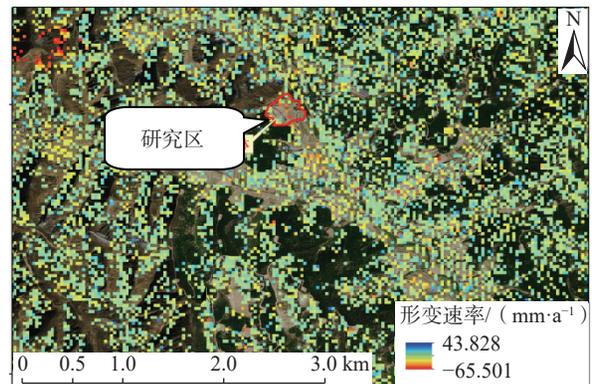


图 3 研究区年平均沉降速率

Fig. 3 Annual average ground subsidence rate in the study area

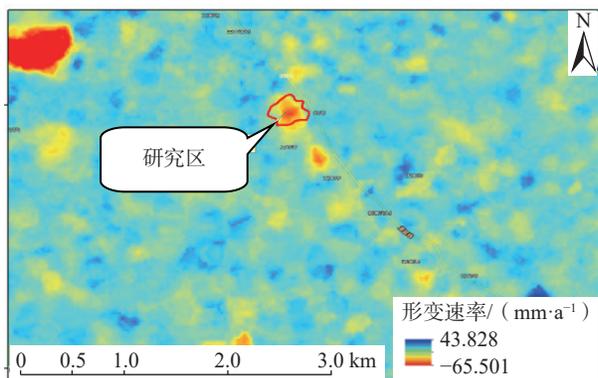


图 4 研究区年平均沉降速率拟合图

Fig. 4 Contour fitting plot of annual average ground subsidence rate in the study area

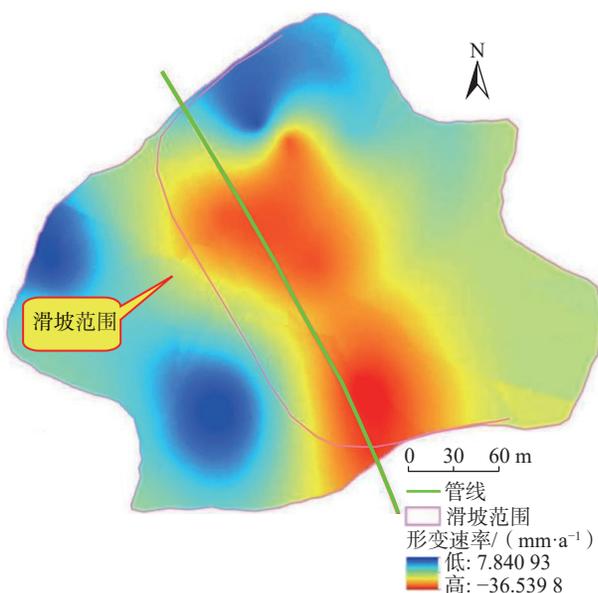


图 5 滑坡区周边年平均沉降速率拟合图

Fig. 5 Contour fitting plot of annual average ground subsidence rate around the landslide area

根据分析显示,近 3 年管道沿线区域地表沉降明显,滑坡范围内地表出现不同程度的下沉趋势,其中,滑坡后缘附近的地表沉降速率最快,达 36.54 mm/a。沿滑坡后缘走向的地表形变方向基本一致,呈现较快速度的下沉趋势,年形变速率超过 20 mm/a。

现场滑坡的地质调查证明了 InSAR 数据变形分析的准确性,在滑坡两侧靠近冲沟与管道相交的位置,地表发育贯通性裂缝,贯通长度多于 100m。后缘主滑壁处形成台阶,主滑壁长约 120 m,台阶高 10 ~ 30 cm,向外移动约 15 cm,倾角约 85°,两侧密集分布宽 0.5 ~ 1.5 m 的串珠状黄土陷穴,滑坡存在向后、向两侧牵引的明显迹象。后缘靠近两侧冲沟位置发育有次级拉张形成的羽状裂缝,裂缝宽度 1 ~ 3 cm,最大贯通长

度约 30 m。

滑坡北侧裂缝宽 30 ~ 60 cm,长约 20 m;南侧裂缝未贯通,地表表现形式为串珠状落水洞,潜蚀洞穴直径 0.5 ~ 1 m。裂缝发育于北侧坡体中部,走向约 205°,宽 0.3 ~ 0.6 m,长约 20 m(图 6 左上、左下)。

根据 InSAR 数据统计分析了 2017 年(3—6 月和 7—12 月)、2018 年(1—6 月和 7—12 月)、2019 年(1—6 月和 7—12 月)和 2020 年(1—4 月)等 7 个时间段滑坡范围内的地表平均累计形变量见表 3。7 个时间段的地表累计形变量呈现不同幅度的变化,2018 年上、下半年的累计形变量分别为 -6.64 mm 和 -8.57 mm,高于其他时期。

2.2 位移数据分析

2.2.1 地表位移监测

滑坡区 2 处地表位移监测点沿管道走向布设,平行于管道,位于管道上方(图 2)。通过对监测数据处理,绘制曲线分析。在监测周期内地表变形可以分为 3 个变形阶段:2019 年 12 月—2020 年 7 月为低速变形阶段,地表位移 1 变形量 15 mm,地表变形 2 变形量 9 mm,变形速率 1 ~ 2 mm/month;2020 年 8 月—2020 年 12 月为快速变形阶段,地表位移 1 变形量 111.8 mm,地表变形 2 变形量 109 mm,变形速率 18 ~ 22 mm/month;2021 年 1 月—2022 年 4 月为低速变形阶段,地表位移 1 变形量 64.2 mm,地表变形 2 变形量 64 mm,变形速率 4 mm/month,该阶段变形速率大于 2019 年 12 月—2020 年 7 月期间的变形速率,而小于 2020 年 8 月—2020 年 12 月(表 4);从位移分量上来看,滑坡地表位移主要表现为垂直方向的沉降;综合地表位移变化方向为 67° ~ 88°,验证了前期勘察中滑坡的总体滑动方向(图 7)。

2.2.2 地表裂缝监测

滑坡区设置的 2 处裂缝布设于已出现的裂缝部位,一处位于滑坡中部平台左侧地表裂缝上方,另一处位于地表位移监测点 2 东北 40°方向 6.5 m 裂缝处。截至 2022 年 4 月 7 日,2 处地表裂缝监测曲线如图 8 所示。根据监测曲线分析,监测周期内两处裂缝变形也可以分为三个变形阶段:2019 年 12 月—2020 年 7 月为低速变形阶段,地表裂缝 1 变形量 1.4 mm,地表裂缝 2 变形量 14.6 mm,变形速率 0.3 ~ 3 mm/month;2020 年 8 月—2020 年 12 月为快速变形阶段,地表裂缝 1 变形量 63.5 mm,地表裂缝 2 变形量 88.4 mm,变形速率 12.7 ~ 17.7 mm/month;2021 年 1 月—2022 年 4 月为低速变形阶段,地表裂缝 1 变形量 13.2 mm,地表裂缝 2 变形量 64 mm,变形速率 0.9 ~ 3.2 mm/month。从变形阶段上来看,两个监测点的

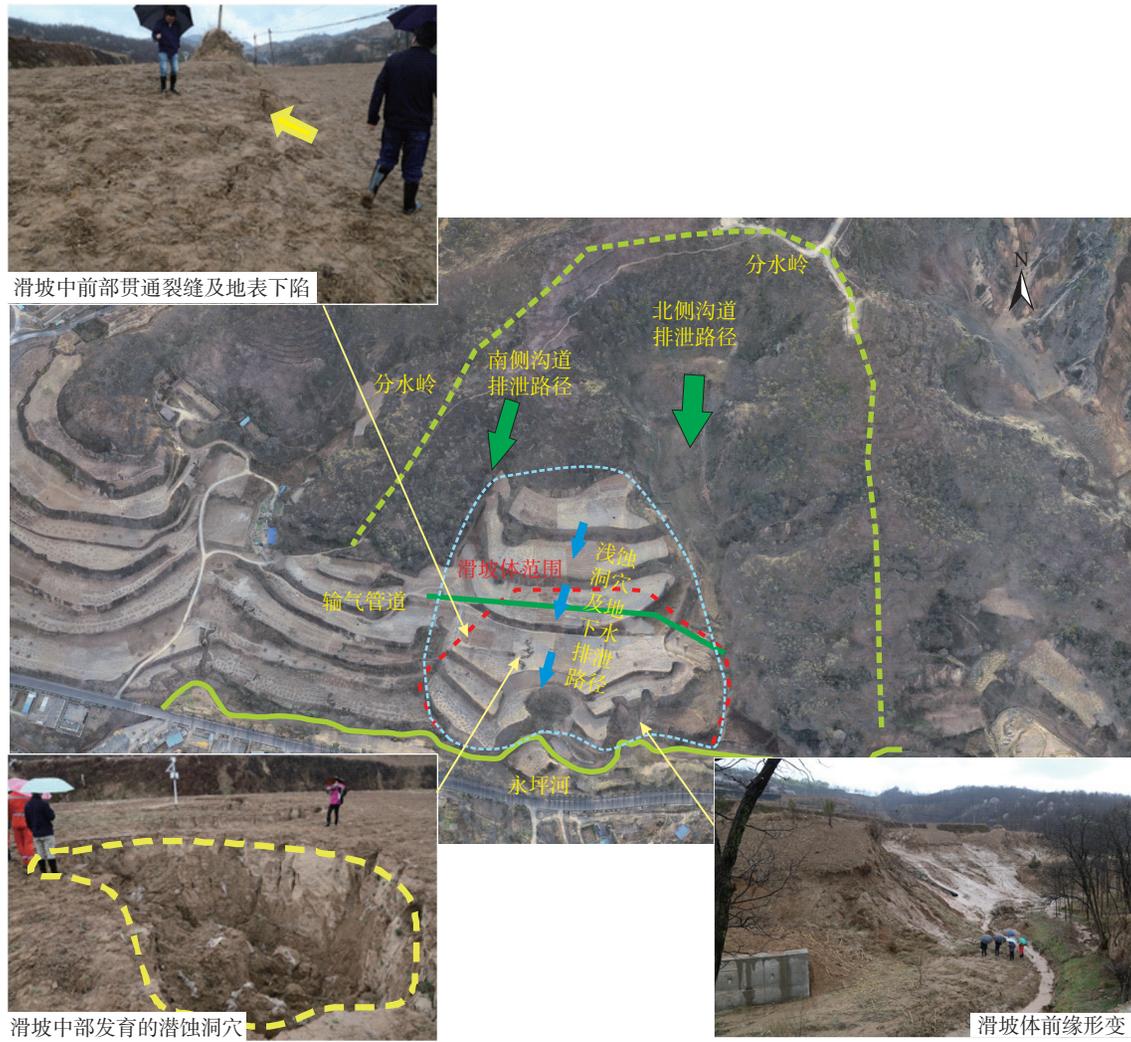


图 6 岭湾村滑坡及周边地表水及地下水排泄路径

Fig. 6 Surface water and groundwater drainage paths in the surrounding area of the landslide in Lingwan Village

表 3 岭湾村滑坡区域时序地表形变量分析(2017 年 3 月—2020 年 4 月)

Table 3 Time-series surface deformation analysis of Lingwan Village landslide (March, 2017—April, 2020)

日期	2017年		2018年		2019年		2020年
	3—6月	7—12月	1—6月	7—12月	1—6月	7—12月	1—4月
累计形变量/mm	-6.81	-4.31	-6.64	-8.57	-4.87	-4.41	-0.29

表 4 地表位移监测数据分析表

Table 4 Summary table of surface displacement monitoring data

监测单元	监测要素	数据范围/mm	变化量/mm	变化方向	监测周期/d	变化趋势
GNSS地表位移监测1	地表位移1_综合	3.6 ~ 176	172.4	向东北移动(88°)	829	低速变形
	地表位移1东西向	-2.8 ~ 83.2	86.0	向东移动		
	地表位移1南北向	1.7 ~ -1.6	3.3	向南移动		
	地表位移1垂直方向	-1.4 ~ -154.6	149.9	向下移动		
GNSS地表位移监测2	地表位移2_综合	4.2 ~ 173	168.8	向东北移动(67°)	829	低速变形
	地表位移2东西向	-1.8 ~ 91.5	93.3	向东移动		
	地表位移2南北向	1.1 ~ 36.8	35.7	向北移动		
	地表位移2垂直方向	3.8 ~ -141.3	145.1	向下移动		

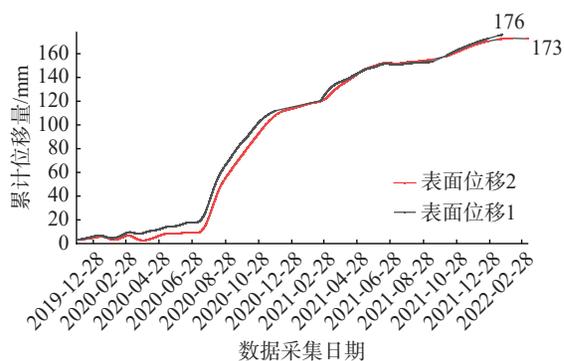


图 7 地表位移监测曲线图

Fig. 7 Ground surface displacement monitoring curve

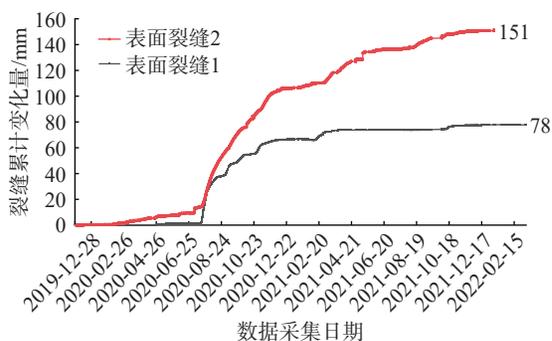


图 8 地表裂缝监测曲线图

Fig. 8 Surface crack monitoring curve

变化趋势保持一致,同时与地表变形监测点 1、2 的变化情况相符(表 5)。相较于裂缝监测点 1 的变化速率和幅度,地表裂缝 2 的变形幅度更大,这从侧面反映了滑坡后缘的变形程度较大,向前部至滑坡中部,变形幅度在逐渐降低。在监测周期内 2 处地表变形数据和 2 处裂缝监测数据的差异也说滑坡内部各个位置的位移是有明显差别的(图 8)。

表 5 地表裂缝监测数据分析表

Table 5 Summary table of surface crack monitoring data

管道桩号	监测要素	数据范围/mm	变化量/mm	监测周期/d	当前变化趋势
DD282	地表裂缝1	0~78	78	829	低速变形
	地表裂缝2	0~151	151	829	低速变形

2.2.3 深部位移监测

在岭湾村滑坡后部边界外侧台坎、滑坡中部以及中前部分别布置 3 处深部位移监测点。根据勘察成果确定滑坡的滑动面在 15 m 以下,因此,深部位移监测点传感器均布置在地表 13 m 以下深度,最大埋深为 32 m。截至 2022 年 4 月 7 日,深部位移监测点 1 不同深度(13 m/24 m/31 m)位移变化为 0.09 mm/mon、0.07 mm/mon、

0.03 mm/mon; 深部位移监测点 2 不同深度(13 m/24 m/31 m)位移变化为 0.003 mm/mon、0.005 mm/mon、0.004 mm/mon; 深部位移监测点 3 不同深度(13 m/25 m/32 m)位移变化为 0.10 mm/mon、0.04 mm/mon、0.01 mm/mon。3 处深部位移监测点的监测曲线如图 9—11 所示,不同深度位移监测数据整体变化小,考虑监测设备的误差精度,结果表明岭湾村滑坡深部变形不明显,滑坡后部的坡体深部也无明显变形(表 6)。

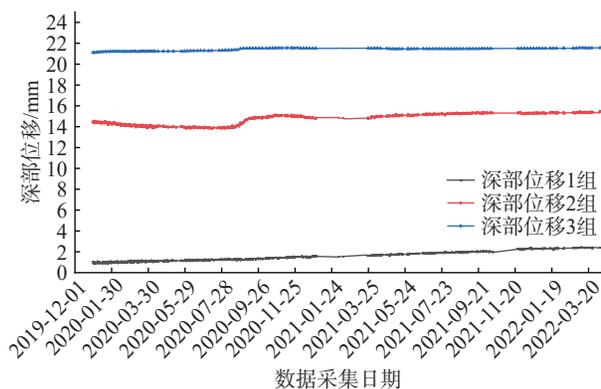


图 9 深部位移 1 监测曲线图

Fig. 9 Deep displacement monitoring curve (No.1)

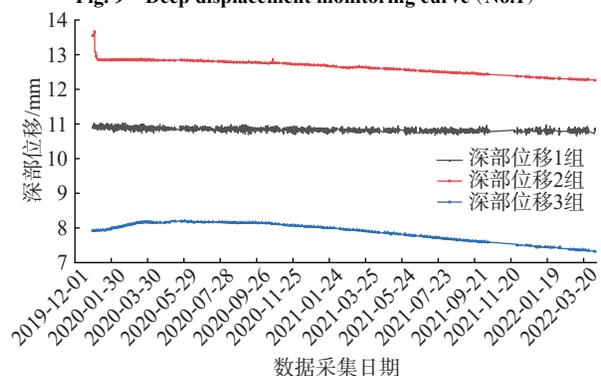


图 10 深部位移 2 监测曲线图

Fig. 10 Deep displacement monitoring curve (No.2)

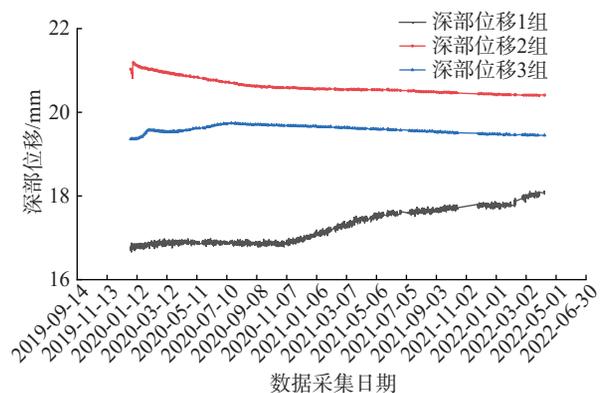


图 11 深部位移 3 监测曲线图

Fig. 11 Deep displacement monitoring curve (No.3)

表 6 深部位移监测数据分析表

Table 6 Summary table of deep displacement monitoring data

序号	管道桩号	监测点位及传感器埋深/m	数据范围/mm	变化量/mm	变化方向/(°)	当前变化趋势
1		深部位移1_13	1.02 ~ 2.38	1.36	58	基本稳定
		深部位移1_24	14.45 ~ 15.47	1.02	58	基本稳定
		深部位移1_31	21.10 ~ 21.56	0.46	58	基本稳定
2	DD282	深部位移2_13	10.90 ~ 10.83	0.05	58	基本稳定
		深部位移2_24	13.55 ~ 12.26	0.07	58	基本稳定
		深部位移2_31	7.92 ~ 7.32	0.60	58	基本稳定
3		深部位移3_13	16.77 ~ 18.10	1.33	58	基本稳定
		深部位移3_25	21.03 ~ 20.41	0.62	58	基本稳定
		深部位移3_32	19.36 ~ 19.45	0.09	58	基本稳定

2.3 雨量监测

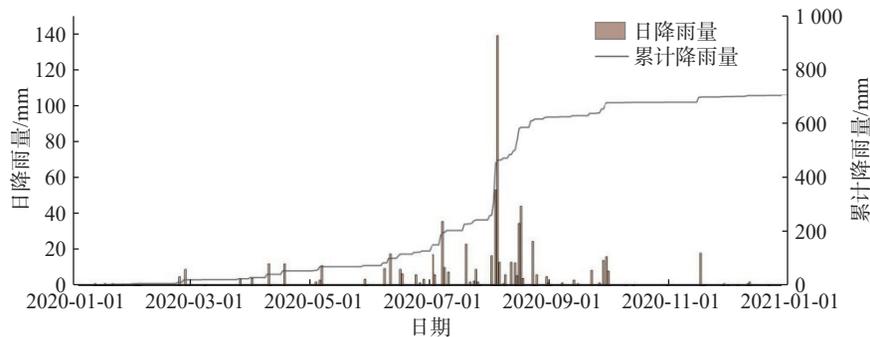
研究区雨量监测数据见表 7, 2020 年和 2021 年实测雨量曲线见图 12。滑坡区 2 年实测雨量监测表明: 滑坡区域降雨主要集中在 6—9 月。监测周期内日最大降雨量 138.5 mm, 出现在 2020 年 8 月 5 日, 此外, 2020 年 8 月 2 日—8 月 6 日及 2021 年 10 月 1 日—10 月 3 日期间连续降雨, 累计降雨量分别达 221.5 mm 和 180 mm,

约占全年总降雨量的 1/3。与滑坡前述地面变形监测时段对照分析, 可以非常清楚地看到区域内降雨集中发生之后的时间段是滑坡变形急速加快的时间, 对于黄土区浅表层的土体, 集中降雨诱发的斜坡浅层滑坡非常明显; 区域已有研究成果也表明^[19-20], 黄土区内短时降雨入渗土体的深度有限, 一般在地表以下 2 m 左右, 最大深度不超过 4 m。因此, 降雨是区域滑坡变形的主

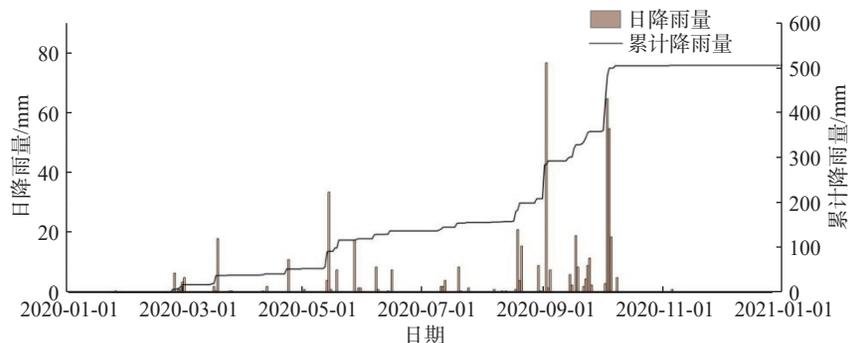
表 7 雨量监测数据分析表

Table 7 Summary of rainfall monitoring data

管道桩号	监测要素	数据范围/mm	单日最大降雨量/mm	周期累计降雨量/mm	累计降雨量发生周期
DD282	雨量	0 ~ 138.5	138.5	221.5	2020年8月2—6日



(a) 2020年降雨量监测曲线



(b) 2021年降雨量监测曲线

图 12 研究区降雨量监测曲线图

Fig. 12 Rainfall monitoring curve in the study area

要诱发因素,岭湾村滑坡的变形发育情况与降雨关系密切。

2.4 地下水监测

2.4.1 含水率

滑坡区 1 处含水率(传感器 1、2、3 安装深度在地表以下 0.5 m、1.0 m、1.5 m 处)监测点安装在滑坡后缘上部平台处,2020—2021 年实测含水率曲线见图 13。对比雨量监测数据并与含水率监测曲线一起分析,集中降雨后地表土体的含水率发生显著变化,随着土体深度的增加,含水率变化量减少,而地表以下 1 m 和 1.5 处的含水率变化量几乎没有区别,这也验证了降雨入渗黄土层的深度是有限的。从不同深度含水率的变化趋势来看,滑坡内的土壤含水率与降雨存在正相关。在强降雨条件下土壤含水率的响应时间很短,在 1 d 内;监测数据表明近地表 0.5 m 处的含水率传感器相对于其他两支更易受到短时降雨影响,滑坡地表土体在小雨-中雨条件下,雨水的入渗深度较浅,深部(1 m 以下)相对浅部(0.5 m)地下水的入渗速率下降;在大雨-暴雨条件下,土体中各深度地下水入渗响应时间相差较小,但土壤内的最高含水率随深度的增加递减。

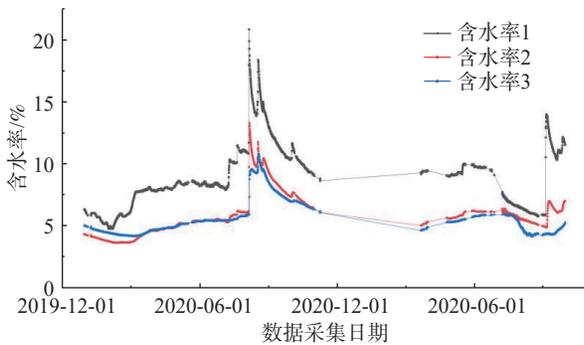


图 13 研究区含水率监测曲线图

Fig. 13 Moisture content monitoring curve in the study area

综合地表变形(地表裂缝、地表位移)监测数据进行分析,滑坡在土壤含水率首次达到峰值(2021-08-05)之后,监测曲线上并未立即发生显著的变形,在经历过一次低谷来到第二个峰值(2021-08-17)之后,滑坡开始出现明显的变形迹象,并进入到持续变形阶段。通过含水率的监测数据分析可以看出,黄土区土体含水率并非是达到某个特定数值滑坡即开始启动变形,其变形特征还与土壤含水率的变化规律有着特殊的关系,土壤含水率作为滑坡预警的要素还需要进一步研究。

2.4.2 孔隙水压力

研究区 3 处孔隙水压力监测点分别埋置在滑坡后

部边界外侧的台坎、滑坡中部及中前部,孔隙水压力计的传感器埋置深度在 15 ~ 25 m,2020—2021 年实测孔隙水压力曲线见图 14。对监测曲线分析表明:研究区滑坡深部孔隙水压力在整个监测周期内均无明显变化,滑坡深部的地下水变化动态变化小,与区域短时降雨条件相关性较小,这个规律也与区域内已有研究成果相同^[19-20]。对比深部位移监测数据,孔隙水压力监测结果也表明岭湾村滑坡为浅层黄土滑坡。

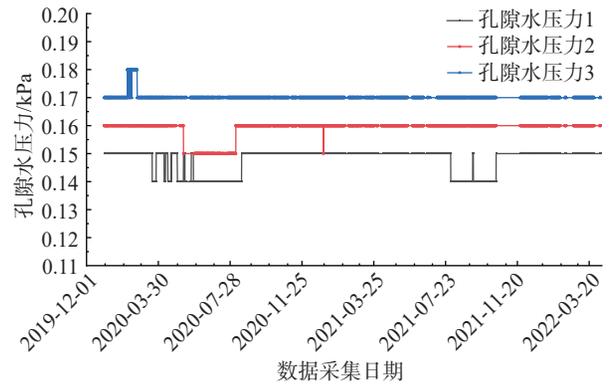


图 14 研究区孔隙水压力监测曲线图

Fig. 14 Pore water pressure monitoring curve in study area

3 滑坡成因机制分析

3.1 内在因素

子长市岭湾村滑坡处于永坪河右岸,根据以往资料分析,该区域为滑坡地质灾害高易发区,受区域内地层岩性、地形地貌、岩土体工程地质性质、水文地质条件等内在因素的影响明显^[21-24],沿永坪河沿岸,滑坡灾害体分布较多,主要形成成因如下:

(1)地层岩性方面:研究区地处陕北黄土丘陵区,原始坡体上陡下缓,综合坡度 15° ~ 25°,斜坡表层覆盖薄层黄土状土, Q_p 黄土大部分沿斜坡顺坡披盖至谷底,呈淡灰黄色,颗粒粗疏松,断面平整,虫孔等不发育,垂直节理发育,厚 2 ~ 15 m,是区内主要的易滑地层;下伏 Q₂ 黄土,呈灰黄色,颗粒粗,断面平整疏松含大孔;间含数层古土壤,成壤较弱,含白色钙质结核,厚 3 ~ 7 m。二者中间存在隔水层。区域内地质环境条件脆弱,属黄土地质灾害高易发区。

(2)水文地质条件方面:研究区为黄土残垣丘陵地貌,滑坡所在斜坡分水岭东北侧范围是地表及地下水的补给区域。原始坡体地表水从两侧冲沟排入坡脚永坪河;滑坡接收大气降雨补给,部分地表水渗入坡体内部形成地下径流^[25],最终也排泄至永坪河;坡体右侧沟谷经过人工改造后成为梯田,阻止了地表水的排泄路径,

部分水体渗入滑坡范围,补给滑坡地下水。目前坡体内部的地下水补给、径流、排泄已相互贯通。从分水岭往下,由最高处向最低处整个坡面潜蚀洞穴发育,坡体变形程度逐渐加强(图6中)。

(3)岩土体性质及结构因素:滑坡上部为强湿陷性黄土,厚度2~15 m(Qp),土体孔隙比达0.92,土壤松散,有利于地表水的入渗,土壤含水量大,主要接受大气降水补给;下部为透水性差的红色黏土(Q₂),以可塑硬-塑状为主,孔隙比较低,渗透性差,厚度最大7.0 m,含水量微弱,有利于地下水沿该层上部聚集,软化界面处土形成滑带土,不利于上覆土层的稳定(图6右下)。

3.2 诱发因素

(1)区域强降雨的影响:西气东输管道所在的子长地区经常有强降雨发生,如2013年7月发生在区域内的强降雨,延安各地7月降雨量几乎相当于全年的降雨量。月累积最大降雨量581 mm,是往年7月平均降雨量的2.26~5.24倍。强降雨导致全市13个县区的158个乡镇、街道办、中心社区受灾,滑塌地段7594处,倒塌房屋2.69万间,受灾人口93.6万人次,因灾造成死亡42人,受伤133人^[21]。DD282管道自2020年8月开始位移速率提高,位移量不断增大,滑坡活动速率加快就与8月份的1次强降雨有关。

(2)人类工程经济活动的影响:区域内的原始斜坡在20世纪70—80年代进行了大规模的土地整治,斜坡体两侧的局部沟道被填平掩埋,斜坡体表面的土体经过削高填低,改变了原始自然土体的厚度和分布,进而改变了坡体内部及地表的水文地质条件。另外,DD282滑坡内还存在一供水管道,近期多次出现管道破裂渗漏的现场,这个因素也是滑坡失稳的诱发因素。

3.3 成因机制

黄土地区整体上降雨量较小,但是在汛期经常发生暴雨和淋雨。区域已有研究成果表明黄土高原区的滑坡主要集中发生在7—10月。研究区勘察、监测数据分析表明,DD282黄土滑坡地表发生了较为明显的变形,而深部位移监测数据在监测段内几乎没有变化,说明该滑坡属于降雨诱发的浅层滑坡。降雨通过深入黄土斜坡影响其稳定性,由于黄土的渗透性很低,现阶段无论降雨后现场观测还是人工模拟降雨入渗试验都表明降雨直接入渗的深度有限,这点从研究区土体含水率监测和孔隙水压力的监测数据可以得到验证。

降雨诱发浅层黄土滑坡是降雨入渗到黄土表层,使其表层黄土软化并增重所致,其破坏模式为原始斜坡→坡面侵蚀→坡脚侵蚀→后缘裂隙扩展→滑动破坏,

成因机制分析如下:

研究区原始坡体汇水面积较大,受人类工程经济活动影响,原始坡体已经改造为梯田,坡体南侧自然排洪冲沟堵塞,降雨后地表水流向坡体中下部并在此汇聚。受黄土内部节理裂隙发育的影响,坡体表面已发育潜蚀裂缝、黄土陷穴,且有不断扩展的趋势;坡面农田改造导致滑坡中下部富水,前缘地下水位高,地层抗剪强度低,且前缘存在约8 m高的陡坎,陡坎底部为永坪河。受坡脚永坪河水流冲刷侵蚀的影响,坡体堆积物被水流不断带走。

研究区表层粉土孔隙比高,厚度较大,有利于地下水径流、赋存,加之在滑坡后部管道为横坡敷设,前期管道建设时管沟开挖回填夯实度不够,降雨后管沟起到了汇集地表水的作用。地表水的汇集不断地浸入斜坡表层土体,软化地层界面处粉土层,降低其抗剪强度,当土体饱和后,其容重进一步增大,坡体失稳,从而产生蠕变滑动。

3.4 发展趋势

子长市岭湾村滑坡位于黄土沟壑丘陵区,区域内黄土类灾害强烈发育,经常造成人员伤亡及财产损失,尤其是在强降雨或者暴雨天气之后,需要格外引起重视^[14-18]。西气东输管道位于滑坡后缘,研究区地层主要由第四系粉土及粉质黏土组成,物质分层明显,且富水性较强,前缘坡体受永坪河冲刷严重,逐渐形成临空面;滑坡前缘部分已经产生变形滑动形成泥石流,不断被地表水冲刷带走。根据滑坡之前的变形情况及现状变形监测分析,滑坡目前处于较稳定状态,发生变形位移的区域主要是浅表层土体。管道本体的应变监测数据表明:DD282滑坡内仅有一组应变监测截面轴向附加压应力超过相对容取值的30%,处于蓝色预警级别,其余监测截面均处于无预警级别。因此,在现有工况条件下,西气东输管道运行遭受滑坡灾害的风险处于可控状态;考虑研究区滑坡处于前期蠕滑阶段,后期在强降雨等诱发因素下有进一步失稳的可能,将会威胁滑坡后缘输气管道的运行安全。

4 结论

(1)子长市岭湾村黄土滑坡是黄土高原地区沟谷分布广泛的沟谷型黄土滑坡,基于InSAR数据分析,位移监测、地下水监测和孔隙水压力监测数据分析认为,该滑坡为降雨诱发的浅层滑坡,滑坡现阶段处于蠕滑阶段。

(2)利用InSAR和GNSS监测技术对黄土区滑坡的

变形监测优势明显,二者结合利用,可有效分析黄土滑坡的变形过程,同时也为判断滑坡的性质提供了依据。

(3)研究区滑坡的发育受区域地形地貌、岩土体特征、水文地质特征等内在因素的控制,而区域降雨和人类工程经济活动等作为诱发因素也对滑坡的变形作用显著,结合西气东输管道应变监测结果,目前管道遭受滑坡灾害的风险可控。

参考文献(References):

- [1] 李智毅, 颜宇森, 雷海英. 西气东输工程建设用地区的地质灾害 [J]. 地质力学学报, 2004, 10(3): 253-259. [LI Zhiyi, YAN Yusen, LEI Haiying. Geological hazards in the area for the construction of pipelines in the project of diversion of natural gas from the western to the eastern region [J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10(3): 253-259. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 鲜福, 关惠平, 姚安林, 等. 西气东输管道地质灾害辨识 [J]. 油气田地面工程, 2010, 29(3): 80-82. [XIAN Fu, GUAN Huiping, YAO Anlin, et al. Geological disaster identification of west-east gas pipeline [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2010, 29(3): 80-82. (in Chinese)]
- [3] 席莎, 文宝萍. 西气东输甘-陕-晋段滑坡对管道的破坏特点 [J]. 人民长江, 2018, 49(2): 62-68. [XI Sha, WEN Baoping. Deformation characteristics of west-to-east gas pipelines in Gansu-Shaanxi-Shanxi caused by landslides [J]. Yangtze River, 2018, 49(2): 62-68. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540. [ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李艳杰, 唐亚明, 邓亚虹, 等. 降雨型浅层黄土滑坡危险性评价与区划——以山西柳林县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 105-114. [LI Yanjie, TANG Yaming, DENG Yahong, et al. Hazard assessment of shallow loess landslides induced by rainfall: A case study of Liulin County of Shanxi Province full text replacement [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 105-114. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘朋飞, 李滨, 陈志新. 陕西延安地区黄土滑坡特征及其活跃性分期 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(4): 16-19. [LIU Pengfei, LI Bin, CHEN Zhixin. Characteristics and staging of the loess landslide in the Yan'an area, Shaanxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(4): 16-19. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王新刚, 刘凯, 王友林, 等. 典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 137-143. [WANG Xingang, LIU Kai, WANG Youlin, et al. An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 137-143. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李锴, 李江, 顾清林, 等. 西气东输智慧管网建设实践 [J]. 油气储运, 2021, 40(3): 241-248. [LI Kai, LI Jiang, GU Qinglin, et al. Practice of intelligent pipeline network development in West-East Gas Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 241-248. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 董绍华, 张铁男, 左丽丽. 中外智慧网最新发展、存在问题及解决方案 [J]. 油气储运, 2021, 40(1): 1-8. [DONG Shaohua, ZHANG Yinan, ZUO Lili. Intelligent pipeline network at home and abroad: Recent development, existing problems and solutions [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 顾清林, 毛健, 王子. 西气东输地质灾害防治实践与展望 [C] // 中国灾害防御协会油气储运自然灾害防治专业委员会第一届年会, 2019. [GU Qinglin, MAO Jian, WANG Zi. Practice and prospect of geological disaster prevention in West-East Gas Pipeline [C] // First Annual Meeting of China Disaster Prevention Association Oil and Gas Storage and Transportation Natural Disaster Prevention Committee, 2019. (in Chinese)]
- [11] 邹永胜, 李双琴, 高建章, 等. 天地联合的区域山地管道地质灾害监测预警体系研究 [J]. 中国管理信息化, 2020, 23(15): 192-196. [ZOU Yongsheng, LI Shuangqin, GAO Jianzhang, et al. Study on monitoring and early warning system of regional mountain pipeline geological disasters combined with heaven and earth [J]. China Management Informationization, 2020, 23(15): 192-196. (in Chinese)]
- [12] 李星宇. 滑坡变形高精度智能化监测预警技术研究与实践 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 21-29. [LI Xingyu. Research and practice of high-precision intelligent monitoring and early warning technology for landslide deformation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 21-29. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨成业, 张涛, 高贵, 等. SBAS-InSAR技术在西藏江达县金沙江流域典型巨型滑坡变形监测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 94-105. [YANG Chengye, ZHANG Tao, GAO Gui, et al. Application of SBAS-InSAR technology in monitoring of ground deformation of representative giant landslides in Jinsha River Basin, Jiangda

- County, Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 94 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [14] ROGERS A E, INGALLS R P. Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry [J]. *Science*, 1969, 165(3895): 797 – 799.
- [15] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. *Nature*, 1993, 364(6433): 138 – 142.
- [16] 西气东输一线DD282滑坡治理项目岩土工程勘察报告 [R]. 南京: 江苏省地质工程有限公司, 2015. [Geotechnical investigation report of DD282 landslide treatment project in West-East Gas Pipeline [R]. Nanjing: Jiangsu Geological Engineering Co. Ltd., 2015. (in Chinese)]
- [17] 西气东输一线管道工程DD282滑坡补充勘察项目岩土工程勘察报告 [R]. 北京: 中国石油天然气管道工程有限公司, 2021. [Geotechnical investigation report of DD282 landslide supplementary exploration project of West-East Gas Pipeline Project [R]. Beijing: China National Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd., 2021. (in Chinese)]
- [18] 国家管网公司西气东输分公司输气管道地质灾害监测报告 [R]. 北京: 北京中地华安科技股份有限公司, 2022. [Geological disaster monitoring report of gas transmission pipeline of national pipe network company West - East Gas transmission branch [R]. Beijing: Beijing Zhongdi Huaan Technology Co. Ltd., 2022. (in Chinese)]
- [19] 刘银鹏, 李同录, 胡向阳, 等. 陇东陕甘边界降雨水毁灾情调查与启示 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 77 – 83. [LIU Yinpeng, LI Tonglu, HU Xiangyang, et al. Investigation of water induced damages triggered by rainfall in east Gansu and the implications [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 77 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [20] LI Ping, LI Tonglu, VANAPALLI S K. Influence of environmental factors on the wetting front depth: a case study in the Loess Plateau [J]. *Engineering Geology*, 2016, 214: 1 – 10.
- [21] 黄玉华, 武文英, 冯卫, 等. 陕北延安“7·3暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征 [J]. *西北地质*, 2014, 47(3): 140 – 146. [HUANG Yuhua, WU Wenyong, FENG Wei, et al. Main types and characteristics of the geo-hazards triggered by heavy rain on July 3 in Yan 'an, Shaanxi [J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(3): 140 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张茂省, 韩乾隆, 黄玉华, 等. 黄土高原沟谷型滑坡整治研究——以延安市子长县阎家沟滑坡为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(2): 135 – 138. [ZHANG Maosheng, HAN Qianlong, HUANG Yuhua, et al. A study of remediation of valley-type landslides in the Loess Plateau: Exemplified by the Yanjiagou landslide in Zichang County of Yan 'an [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(2): 135 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 范立民, 李勇, 宁奎斌, 等. 黄土沟壑区小型滑坡致大灾及其机理 [J]. *灾害学*, 2015, 30(3): 67 – 70. [FAN Limin, LI Yong, NING Kuibin, et al. Small landslide and disaster-causing mechanism in gully loess area [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(3): 67 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王滔, 赵学理, 齐普荣. 持续强降雨对黄土地区滑坡地质灾害的影响——以延安地区为例 [J]. *地质调查与研究*, 2014, 37(3): 224 – 229. [WANG Tao, ZHAO Xueli, QI Purong. Impact of continued heavy rainfall on loess land slide hazard areas: A case study on Yan 'an [J]. *Geological Survey and Research*, 2014, 37(3): 224 – 229. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张珊珊. 黄土斜坡优势通道及优势入渗规律 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [ZHANG Shanshan. The preferential passage and the law of preferential infiltration of loess slope [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018(in Chinese with English abstract)]