

文章编号: 1007-2993(2026)03-0366-07

# 降雨与浅层黄土滑坡地表位移相关性研究 ——以西安市东张坡村滑坡为例

任秀芳 李凯 瞿斌 魏智远  
(陕西天地地质有限责任公司, 陕西西安 710054)

**【摘要】** 东张坡村滑坡属降雨型浅层黄土滑坡。为揭示降雨引发浅层黄土滑坡变形的规律, 进而为区域浅层黄土滑坡雨季预警提供依据, 对该滑坡开展降雨-土体含水率-坡体变形监测和关联性分析。研究表明: 在降雨量出现峰值的工况下, 滑坡体表层水平位移及垂直位移基本呈现峰值, 从降雨与坡体位移变化趋势上分析, 东张坡村滑坡属典型降雨型滑坡; 皮尔逊相关系数法分析表明, 地表下 0.2~4.2 m 深度内土体含水率与降雨量的相关性关系为极强相关, 土体含水率变化的滞后时间介于 30~196 h, 且随着埋藏深度的增大, 含水率随降雨量变化的滞后时间逐渐增大; 地表位移与深度 0.2 m 处土体含水率增量为极强相关, 与深度 0.7, 1.2, 1.5 m 处土体含水率增量为中等强度相关, 与深度 2.2, 3.2, 4.2 m 处土体含水率增量为弱相关, 表明该滑坡变形以浅表层位移为主; 从地表位移随含水率增长的滞后性方面看, 各深度峰值相关系数均出现在 24 h 内, 滞后性很小, 表明在土体含水率增长后的很短时间内坡体即会发生变形。

**【关键词】** 含水率; 降雨量; 地表变形; 相关性

**【中图分类号】** P642.22

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0034

## Correlation between rainfall and surface displacement of shallow loess landslides: a case study of Dongzhangpo Village landslide, Xi'an

REN Xiufang LI Kai QU Bin WEI Zhiyuan  
(Shaanxi Tiandi Geology Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**【Abstract】** The Dongzhangpo Village landslide is a rainfall-triggered shallow loess landslide. To reveal the deformation mechanism of shallow loess landslides induced by rainfall and provide a basis for the early warning of regional shallow loess landslides during the rainy season, monitoring and correlation analysis of rainfall, soil moisture content and slope deformation were carried out on this landslide. The results show that the horizontal and vertical displacements on the landslide surface basically reach their peaks under the condition of rainfall peaks. According to the variation trends of rainfall and slope displacement, the Dongzhangpo Village landslide is a typical rainfall-triggered landslide. The Pearson correlation coefficient analysis indicates that the soil moisture content at depths of 0.2~4.2 m below the ground surface has an extremely strong correlation with rainfall. The lag time of soil moisture content variation ranges from 30 to 196 h, and the lag time gradually increases with the increase of burial depth. The surface displacement has an extremely strong correlation with the increment of soil moisture content at 0.2 m depth, a moderate correlation with that at 0.7 m, 1.2 m and 1.5 m depths, and a weak correlation with that at 2.2 m, 3.2 m and 4.2 m depths, indicating that the landslide deformation is dominated by shallow surface displacement. In terms of the lag of surface displacement behind the increase of moisture content, the peak correlation coefficients at all depths appear within 24 h with very small lag, showing that slope deformation occurs shortly after the increase of soil moisture content.

**【Key words】** moisture content; precipitation; ground surface deformation; correlation

### 0 引言

我国黄土分布面积约占国土面积的 6.6%, 占世界黄土覆盖面积的 4.9%。特别是我国西北黄土高原

地区, 以黄土地层全、类型多、分布广、厚度大而著称<sup>[1-2]</sup>。黄土特定的沉积环境使其具有非常独特的结构特性。遇水浸湿时, 黄土结构迅速破坏, 强度急速

基金项目: 陕西省煤田地质集团科技创新能力支撑项目(SMDZ-2023CX-15)

作者简介: 任秀芳, 女, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、地质灾害防治等工作。E-mail: 393299858@qq.com

下降,这是黄土滑坡在降雨条件下易发生滑动的主要原因,尤其是浅层黄土滑坡发生、发展的一个重要外部条件<sup>[3]</sup>。

我国是一个地质灾害发生十分频繁、损失极为严重的国家<sup>[4]</sup>。在所有地质灾害中,滑坡灾害发生次数最多,造成的损失最为严重<sup>[5]</sup>。据2000—2016年全省地质灾害统计数据,滑坡占灾害总数的60.76%。陕西省地质灾害以滑坡为主,省内多地市调查显示,滑坡占比普遍接近或达57%以上。其中,浅层滑坡(含黄土浅层滑坡、堆积层浅层滑坡)为主要发育类型,占滑坡总数的90%以上,是全省地质灾害防治的重点对象。据气象部门预测,21世纪前期气候变化趋于活跃期,陕西省近年来降水有进一步增多趋势,区域强降水等极端气候事件将明显增多,强降雨引发的滑坡等地质灾害将会加剧,未来5年将呈高发态势。因此,开展降雨作用下浅层滑坡机理研究具有重要意义。

针对降雨与滑坡的相关性,专家学者进行了大量研究。高华喜等<sup>[6]</sup>研究了深圳市的降雨与滑坡的关系;李长江等<sup>[7]</sup>对滑坡的频率和降雨量进行了分析;李媛<sup>[8]</sup>、李鹤<sup>[9]</sup>、李长江等<sup>[10]</sup>从不同维度对降雨型滑坡进行了预测预报;王俊等<sup>[11]</sup>通过建立模型试验对降雨型滑坡预警进行研究;艾鸿敏<sup>[12]</sup>利用GPS技术对云阳王家湾和忠县滑坡进行监测,应用回归分析和卡尔曼滤波理论,对降雨型滑坡特征、滑坡位移与降雨量及滑坡预警等方面进行系统深入研究;丁继新等<sup>[13]</sup>从降雨量、暴雨强度及降雨时间三个不同因素分析了三峡地区部分县市的滑坡与降水的关系,提出了降雨因子的概念。

综上所述,现有研究较少涉及浅层滑坡,而浅层滑坡是我国主要的滑坡灾害形式之一,因此,有必要对浅层滑坡开展进一步的研究和探索<sup>[14]</sup>。西安市灞桥区东张坡村滑坡属典型的黄土浅层滑坡,通过在滑坡体上安装GNSS监测设备、翻斗式雨量监测设备、土体含水率监测设备,获取滑坡区域降雨量、坡体土体含水率、坡体地表变形年度监测数据,通过数据分析降雨对地表变形的影响,对降雨量-土体含水率、土体含水率-地表变形进行关联性分析,与地表变形监测特征相互印证,揭示降雨引发滑坡地表变形的规律,为该区及周边浅层滑坡雨季预警提供依据。

### 1 东张坡村滑坡现状

东张坡村滑坡位于西安市灞桥区席王街道东张坡村,为老滑坡的中上部局部复活。滑坡长约160 m,宽约210 m,滑体平均厚度约15 m,规模为 $5.04 \times$

$10^4 \text{ m}^3$ ,属中型浅层滑坡。

滑坡体坡面呈阶梯状,陡缓交错,滑坡后缘陡立,高差约12 m,陡坎经人为开垦及自然崩落,后缘中下部堆积有较多崩滑堆积体;滑坡中部为宽缓阶梯状平台,高差约20 m,长约100 m,坡度约11.3°;平台前缘为一处直线型斜坡,坡高约16~20 m,长约45~60 m,最大坡度约25°,坡脚至居民屋后,坡体植被较为茂密,滑坡全貌见图1、图2。



图1 东张坡村滑坡全貌(镜像210°)

Fig. 1 Panoramic view of Dongzhangpo Village landslide (mirror image at 210°)

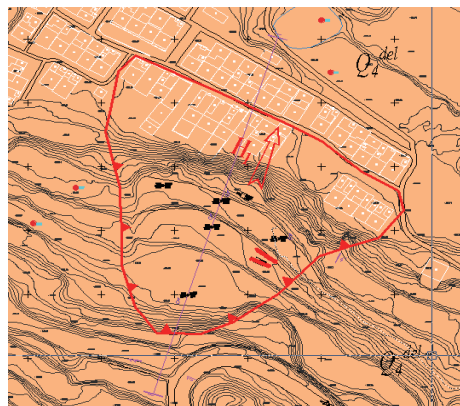


图2 东张坡村滑坡地形图

Fig. 2 Complete topographic panorama of Dongzhangpo Village landslide

近年来受汛期强降雨影响,该滑坡局部发生浅表层位移,坡体上部分树木发生歪斜,尚未有整体滑动迹象。

东张坡村滑坡为老滑坡中上部局部复活。根据钻探揭露,滑坡存在两层滑面,第一层滑面位于坡面下部8~11 m位置,第二层滑面位于坡面以下50~60 m。第一层滑面土体由上至下分别为黄土、古土壤、淤泥质土,土质较疏松,含水量较高;第一层滑面至第二层滑面之间为接近原状的黄土古土壤互层,土质较均匀,底部为蓝田组红黏土,滑面位于该层红黏土中,滑面处多见擦痕,黄土原生节理保存较好。滑坡典型工程地质剖面见图3。

为研究降雨对滑坡体浅层地表变形的影响,在

滑坡体上安装 GNSS 监测设备、翻斗式雨量监测设备及土体含水率监测设备(见图 4)。通过监测降雨量与地表下 4.2 m 深度范围内变形量,揭示降雨量与土体含水率及地表变形关联性,分析降雨对滑坡体地表位移的影响。

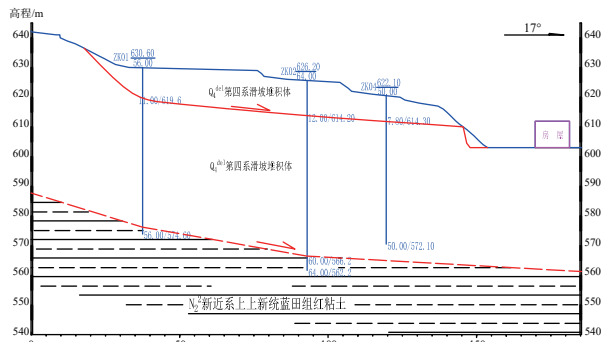


图 3 东张坡村滑坡工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological section of Dongzhangpo Village landslide

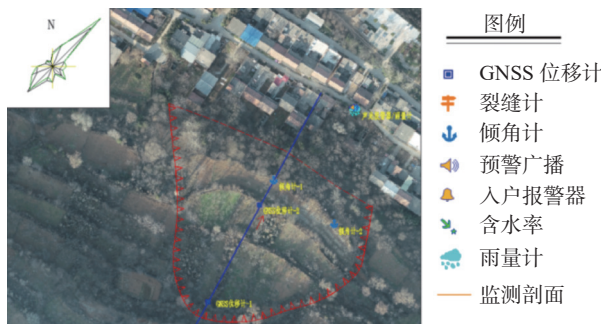


图 4 东张坡村滑坡监测设备平面布设示意图

Fig. 4 Schematic plan of monitoring equipment layout for Dongzhangpo Village landslide

## 2 降雨与坡体地表位移的相关性分析

### 2.1 降雨与滑坡体位移相关性直观分析

东张坡村滑坡区域 2023 年月累计降雨量监测统计数据如图 5 所示。

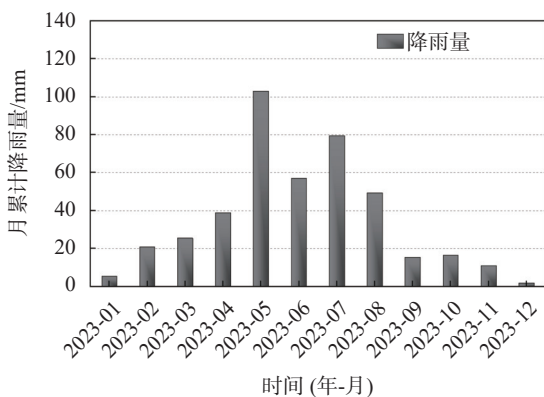


图 5 东张坡村滑坡区月累计降雨量图

Fig. 5 Monthly cumulative rainfall map of Dongzhangpo Village landslide area

从图 5 降雨监测数据可知,5 月份月累计降雨量出现峰值,相应的地表水平位移与垂直位移均有增大趋势(见图 6、图 7)。

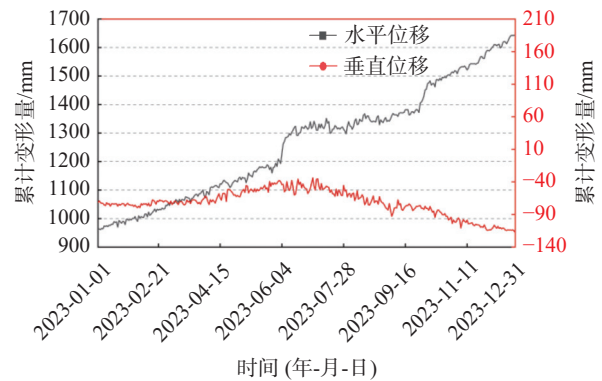


图 6 东张坡村滑坡体水平和垂直位移累计变形量年度变化趋势图

Fig. 6 Annual variation trend chart of cumulative horizontal and vertical displacement deformation of Dongzhangpo Village landslide mass

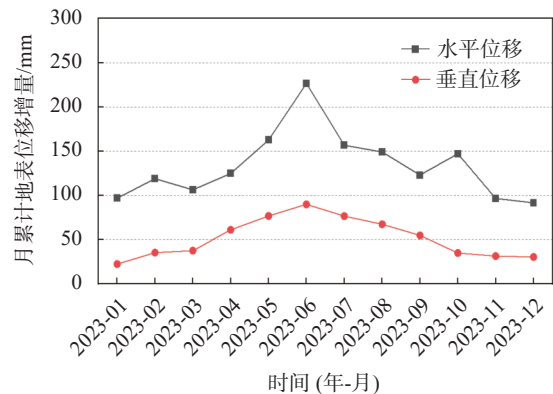


图 7 东张坡村滑坡体水平和垂直位移月累计增量趋势图

Fig. 7 Monthly cumulative increment trend chart of horizontal and vertical displacement of Dongzhangpo Village landslide mass

通过分析图 6、图 7 可知,在 5—6 月降雨量出现峰值情况下,坡体水平位移、垂直位移及累计地表位移增量也相应出现峰值。由于 5—6 月的降雨已使浅层滑体充分饱和软化,进而产生较大变形,滑体经应力调整后变形基本趋于稳定,因此后续 7—8 月降雨对滑体软化作用有限,因而坡体变形增加不明显。但从降雨量引发地表变形的整体趋势上来看,东张坡村滑坡在降雨的作用下会产生坡体下滑现象,因此该滑坡属降雨型滑坡。

为深入分析降雨对滑坡变形的作用机理,分别针对降雨与坡体土层含水率的相关性及坡体含水率变化与滑体变形的相关性进行分析。

### 2.2 降雨与滑坡体表层土体含水率相关性分析

图 8 为 2023 年东张坡村滑坡区坡体不同深度

土层月含水率变化图。结合图 5 可以看出, 5 月份降雨量突增, 坡体含水率也随之增大, 总体上来说坡体土层含水率与降雨量变化趋势基本保持一致。长时间的降雨入渗增加了滑坡体不同深度土层的含水率, 尤其对于地表下 3.2 m 深度范围的土层含水率影响表现得更加明显, 因此土层含水率与降雨量存在显著的相关性。

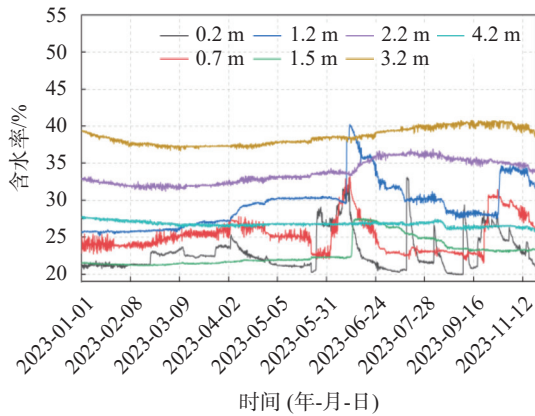


图 8 东张坡村滑坡体不同深度含水率变化图  
Fig. 8 Variation chart of moisture content at different depths of Dongzhangpo Village landslide mass

图 8 虽然显示坡体表层(3.2 m 内)含水率变化与降雨量变化趋势基本保持一致, 但含水率变化明显滞后于降水量变化, 且深度越深, 滞后性表现得越明显。这是因为降雨初期, 由于渗流过程中的气塞效应, 土体孔隙结构限制渗流路径, 因此含水率在此阶段变化表现不明显, 且随着深度的增加, 水力行为变化的滞后性逐渐加大。降雨过后土体上层水分在重力作用下向下迁移, 造成了土体下层含水率逐步增加。

为进一步研究不同深度土样含水率增量与降雨量变化的相关性及滞后性, 采用皮尔逊相关系数法进行分析, 分析结果如图 9—图 13 所示。

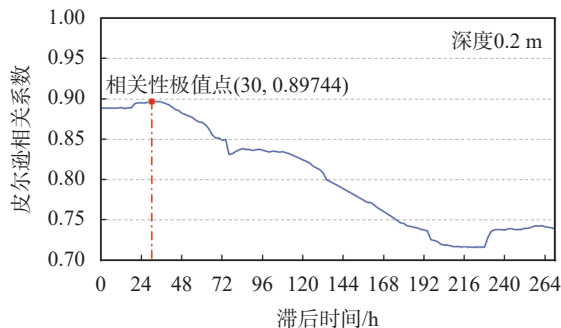


图 9 深度 0.2 m 土体含水率增量与降雨量的相关性及滞后性  
Fig. 9 Correlation and hysteresis between soil moisture content increment at 0.2 m depth and rainfall



图 10 深度 0.7 m 土体含水率增量与降雨量的相关性及滞后性  
Fig. 10 Correlation and hysteresis between soil moisture content increment at 0.7 m depth and rainfall

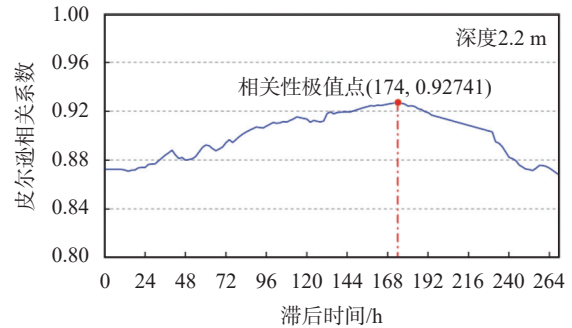


图 11 深度 2.2 m 处土体含水率增量与降雨量的相关性及滞后性  
Fig. 11 Correlation and hysteresis between soil moisture content increment at 2.2 m depth and rainfall

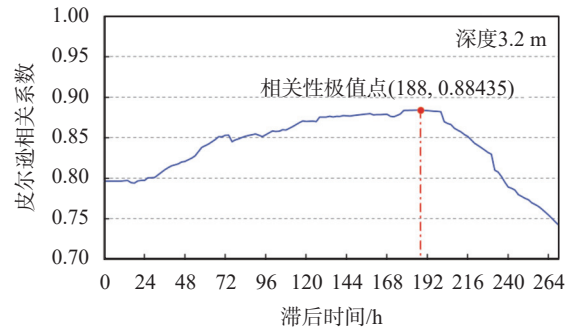


图 12 深度 3.2 m 处土体含水率增量与降雨量的相关性及滞后性  
Fig. 12 Correlation and hysteresis between soil moisture content increment at 3.2 m depth and rainfall

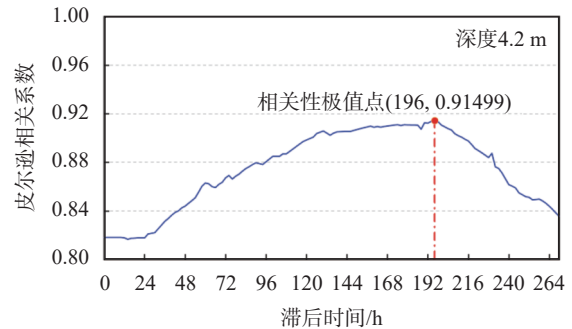


图 13 深度 4.2 m 处土体含水量与降雨量的相关性及滞后性  
Fig. 13 Correlation and hysteresis between soil water content at 4.2 m depth and rainfall

从分析结果可以看出,深度 0.2, 0.7, 2.2, 3.2, 4.2 m 处土体含水率增量与降雨量的皮尔逊相关系数分别为 0.89744, 0.71768, 0.92741, 0.88435, 0.91499, 整体介于 0.8 ~ 0.9, 说明在 0.20 ~ 4.20 m 深度范围内坡体含水率增量与降雨量的相关性关系为极强相关。含水率与降雨量峰值相关系数滞后时间介于 30 ~ 196 h, 其中深度 0.2, 0.7, 2.2, 3.2, 4.2 m 处土体含水率达到峰值的滞后时间分别为 30, 112, 174, 188, 196 h。可见,随着埋藏深度的增大,含水率与降雨量峰值相关系数滞后时间逐渐增大,计算结果与之前的降雨量及坡体不同深度含水率变化滞后规律一致。

2.3 土体含水率与地表位移的相关性分析

降雨入渗导致土体含水率增大,增加滑坡的自重和下滑力,进而导致滑坡体发生位移。因此,土体含水量增量应与地表位移增量相关。同样采用皮尔逊相关系数法将对不同深度月累计地表位移增量与含水率增量进行相关性分析及滞后性分析,分析结果见图 14—图 20。

从图 14—图 20 分析曲线中可以看出,深度 0.2,

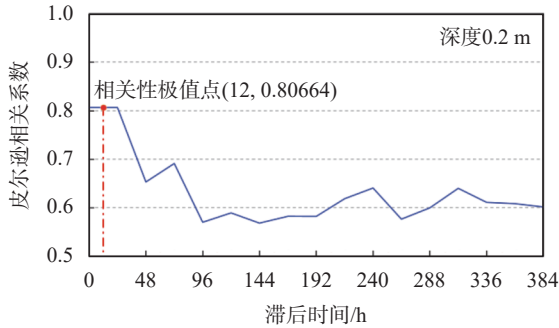


图 14 地表位移增量与深度 0.2 m 处土体含水率增量的相关性及其滞后性

Fig. 14 Correlation and hysteresis between surface displacement increment and soil moisture content increment at 0.2 m depth

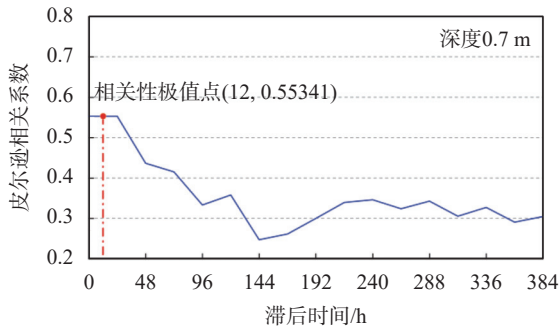


图 15 地表位移增量与深度 0.7 m 处土体含水率增量的相关性及其滞后性

Fig. 15 Correlation and hysteresis between surface displacement increment and soil moisture content increment at 0.7 m depth

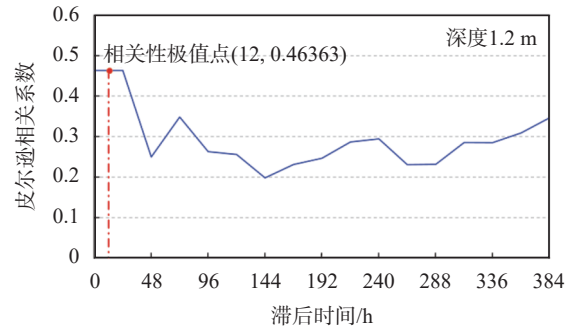


图 16 地表位移增量与深度 1.2 m 处土体含水率增量的相关性及其滞后性

Fig. 16 Correlation and hysteresis between surface displacement increment and soil moisture content increment at 1.2 m depth

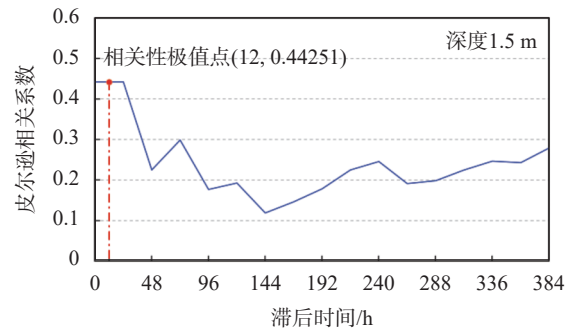


图 17 地表位移增量与深度 1.5 m 处土体含水率增量的相关性及其滞后性

Fig. 17 Correlation and hysteresis between surface displacement increment and soil moisture content increment at 1.5 m depth

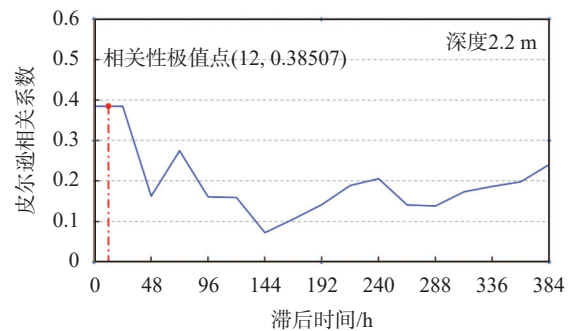


图 18 地表位移增量与深度 2.2 m 处土体含水率增量的相关性及其滞后性

Fig. 18 Correlation and hysteresis between surface displacement increment and soil moisture content increment at 2.2 m depth

0.7, 1.2, 1.5, 2.2, 3.2, 4.2 m 处含水率增量与地表位移增量的皮尔逊相关系数分别为 0.806639, 0.553409, 0.463631, 0.442507, 0.385066, 0.358099, 0.345857, 相关系数整体介于 0.34 ~ 0.81。由此推断,地表位移增量与深度 0.2 m 处土体含水率增量为极强相关,与深度 0.7, 1.2, 1.5 m 处土体含水率增量为中等强度相关,与深度 2.2, 3.2, 4.2 m 处土体含水率增量为弱相关,

这一现象也说明该处滑坡位移以浅表层位移为主。从地表位移增量随含水率增长的滞后性方面看,各深度峰值相关系数均出现在 24 h 内,位移增量滞后性很小,表明在土体含水率增长后的很短时间内坡体即会发生变形。

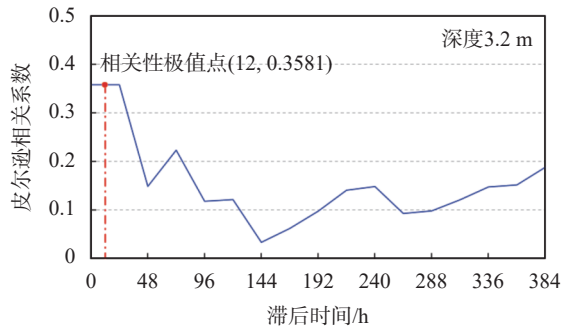


图 19 地表位移增量与深度 3.2 m 处土体含水率增量的相关性 & 滞后性

Fig. 19 Correlation and hysteresis between surface displacement increment and soil moisture content increment at 3.2 m depth

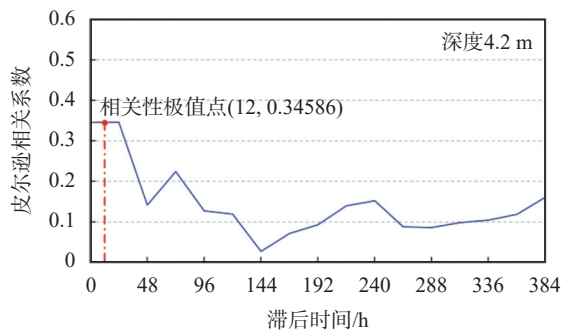


图 20 地表位移增量与深度 4.2 m 处土体含水率增量的相关性 & 滞后性

Fig. 20 Correlation and hysteresis between surface displacement increment and soil moisture content increment at 4.2 m depth

### 3 结论

(1)根据降雨与地表变形监测数据可知,在降雨量出现峰值的工况下,滑坡体表层水平位移与垂直位移基本呈现峰值,从降雨与坡体位移变化趋势上分析,东张坡村滑坡属浅层降雨型滑坡。

(2)东张坡村滑坡区域表层土体含水率变化与降雨量变化趋势基本保持一致。但由于坡体入渗需要时间,故坡体含水率变化滞后于降水量变化,且随着深度增加,含水率变化的滞后性越明显。

(3)通过进行不同深度土样含水率增量与降雨量的皮尔逊相关性分析可知,地表下 0.2 ~ 4.2 m 深度内土体含水率变化量与降雨量的相关性关系为极强相关。土体含水率变化的滞后时间介于 30 ~ 196 h,且随着埋藏深度的增大,含水率随降雨量变化的滞后

时间逐渐增大。

(4)通过对地表位移增量与不同深度土体含水率增量进行相关性 & 滞后性分析可知,地表位移与深度 0.2 m 处土体含水率增量为极强相关,与深度 0.7, 1.2, 1.5 m 处土体含水率增量为中等强度相关,与深度 2.2, 3.2, 4.2 m 处土体含水率增量为弱相关,表明该滑坡变形以浅表层位移为主。从地表位移随含水率增长的滞后性方面看,各深度峰值相关系数均出现在 24 h 内,滞后性很小,表明在土体含水率增长后的很短时间内坡体即会发生变形。

(5)本文监测分析研究表明,浅层降雨型滑坡对降雨较为敏感,加强汛期预警、坡体监测和现场巡视极为关键,发现异常及时采取措施,可避免人员伤亡和财产损失。

受客观条件限制,本次降雨-坡体变形监测时间较短,且局部监测数据缺失,导致分析结果具有一定局限性,希望在下一步研究工作中进行完善。

### 参 考 文 献

- [1] 王念秦. 黄土滑坡发育规律及其防治措施研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2004. (WANG N Q. Study on the growing laws and controlling measures for loess landslide[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [2] 韩 帅. 天水地区强降雨诱发黄土-泥岩滑坡机理实验研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2020. (HAN S. Experimental study on the mechanism of loess-mudstone landslide induced by heavy rainfall in Tianshui area[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2020. (in Chinese))
- [3] 许建聪, 尚岳全, 陈佩福, 等. 强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3246-3251. (XU J C, SHANG Y Q, CHEN K F, et al. Analysis of shallow landslide stability under intensive rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3246-3251. (in Chinese))
- [4] 许丁丁. 地质灾害的研究现状 [J]. 山西建筑, 2006, 32(11): 68-69. (XU D D. Research situation of geological hazard[J]. Shanxi Architecture, 2006, 32(11): 68-69. (in Chinese))
- [5] 张卫中. 向家坡滑坡稳定性分析及动态综合治理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007. (ZHANG W Z. Research on stability analysis and dynamic comprehensive treating about Xiangjiapo landslide[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese))
- [6] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨 [J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055-1060.

- (GAO H X, YIN K L. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 1055-1060. (in Chinese))
- [7] 李长江, 麻士华, 李 炜, 等. 滑坡频度-降雨量的分形关系 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(1): 87-93. (LI C J, MA T H, LI W, et al. Fractal relation of landslide frequency and rainfall[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(1): 87-93. (in Chinese))
- [8] 李 媛. 区域降雨型滑坡预报预警方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2005. (LI Y. Method for the warning of precipitation-induced landslides[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005. (in Chinese))
- [9] 李 鹤. 东南沿海残积土地区降雨型滑坡预警预报体系的研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (LI H. Study on early warning system for rain-induced slope failure in residual soils in southeast coastal region of China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [10] 李长江, 麻士华, 朱兴盛. 降雨型滑坡预报的理论、方法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2008. (LI C J, MA T H, ZHU X S. Forecasting of landslides triggered by rainfall: theory methods & applications[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008. (in Chinese))
- [11] 王 俊, 黄润秋, 聂 闻, 等. 基于无限边坡算法的降雨型滑坡预警系统的模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3503-3510. (WANG J, HUANG R Q, NIE W, et al. Experimental study of early warning system model of landslide induced by rainfall based on infinite slope method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3503-3510. (in Chinese))
- [12] 艾鸿敏. 基于 GPS 的降雨型滑坡变形监测与预警 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013. (AI H M. Rainfall-induced landslide deformation monitoring and early warning based on GPS[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese))
- [13] 丁继新, 尚彦军, 杨志法, 等. 降雨型滑坡预报新方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3738-3743. (DING J X, SHANG Y J, YANG Z F, et al. New method of predicting rainfall-induced landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3738-3743. (in Chinese))
- [14] 李 宁, 刘冠麟, 陈有亮, 等. 降雨诱发浅层滑坡影响因素的解析分析 [J]. *上海理工大学学报*, 2018, 40(1): 65-75. (LI N, LIU G L, CHEN Y L, et al. Analytic analysis on the influencing factors of rainfall-induced shallow landslide[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2018, 40(1): 65-75. (in Chinese))

收稿日期: 2025-01-20