

基于时序遥感影像的黄土滑坡形变 与河流水位关系研究 ——以天水市清泉村滑坡为例

负宜含^{1,2}, 张明波¹, 伍宇明^{1*}, 姚佳明¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:河流对岸坡的侵蚀作用是滑坡失稳的重要因素之一, 特别是在中国黄土地区。因此, 探讨河流水位的季节性变化对黄土边坡稳定性的影响规律, 对早期黄土滑坡灾害预警具有重要作用。论文以甘肃省天水市清泉村滑坡为例, 分析5年内沿岸边坡形变速率与季节性水位变化之间的关系。基于SBAS-InSAR技术获取滑坡时序形变信息, 借助MNDWI与DEM获取边坡底部时序水位信息, 并结合GPM降雨数据进行相关性分析, 研究发现随着降雨增多、河流水位的上涨, 清泉村滑坡的形变速率明显增大, 在夏季时滑坡形变量增长较快, 并且边坡形变相较于水位季节变化具有一定的滞后性; 经相关性分析, 得出水位与滑坡形变的相关性系数为0.46, 降雨与滑坡形变的相关性系数为0.39, 表明清泉村滑坡的形变速率与水位变化更相关。因此, 河流的季节性变化对滑坡形变速率具有一定影响, 进而造成河流对沿岸滑坡的侵蚀作用呈现出季节性变化。研究揭示的黄土滑坡与河流水位的季节性变化关系, 对揭示河岸边坡的演化过程、滑坡识别与灾害防治具有重要意义。

关键词:侵蚀型滑坡; 滑坡形变; 河流水位; 关联分析; 黄土滑坡

黄土高原地区滑坡灾害频发, 对黄土滑坡的稳定性研究有利于开展早期灾害预警工作, 减少人员伤亡^[1-3]。由于黄土的湿陷性等特点, 水是影响黄土高原地区滑坡易发的主要原因^[4-5]。由于地处黄河中游, 受河流切割作用的影响, 黄土高原地表沟壑纵横, 河流对沿岸边坡进行下切、侧切和溯源侵蚀, 逐渐改变沿岸边坡应力状态, 扰动河流沿岸黄土滑坡的稳定性, 加速滑坡形变^[1,6-7]。

在流水侵蚀对边坡稳定性的研究方面, 王阿丹^[8]发现, 可以由滑动面抗剪强度的变化反映河流侵蚀对边坡稳定性的扰动影响; 张茂省等^[6]通过研究黄土滑坡的形成机理, 发现河流的侧切和下切作用会

使斜坡应力向不稳定方向发展, 加速滑坡形变; 刘文红^[9]通过对比黄土高原地区河流的下蚀、侧蚀与溯源侵蚀3种侵蚀类型, 得出黄土高原的大型滑坡一般发生在侧蚀期, 溯源侵蚀与下蚀期, 坡体稳定性受河流扰动较小的结论; 袁湘秦等^[10]通过研究泾河流域滑坡发现, 河流的侧蚀作用导致坡脚块体滑动是边坡失稳的主要原因; 张吉宏等^[11]利用数值模拟发现蠕变作用增加了侧蚀滑坡的水平位移。已有的流水侵蚀对黄土滑坡的研究表明, 河流侵蚀尤其是河流侧蚀会导致边坡失稳, 造成滑坡产生位移^[11-5,7]。另外, 径流沿岸黄土滑坡的季节性活动有可能堵塞河流, 抬升河流水位, 增加孔隙水压力, 更

收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-09-09。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题(XDA23090503); 资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目(KPI007)。[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Class A), No. XDA23090503; Key Project of Innovation LREIS, No. KPI007.]

第一作者简介: 负宜含(1995—), 女, 河南人, 硕士生, 主要从事地质灾害与地理信息科学研究。E-mail: phoebeyh97@gmail.com

*通信作者简介: 伍宇明(1989—), 男, 北京人, 博士, 副研究员, 研究方向为地理信息系统技术与应用。E-mail: wuym@lreis.ac.cn

引用格式: 负宜含, 张明波, 伍宇明, 等. 基于时序遥感影像的黄土滑坡形变与河流水位关系研究: 以天水市清泉村滑坡为例[J]. 地理科学进展, 2023, 42(2): 353-363. [Yun Yihan, Zhang Mingbo, Wu Yuming, et al. Relationship between loess landslide deformation and river water level based on time series remote sensing images: A case study of the Qingquan Village landslide in Tianshui City. Progress in Geography, 2023, 42(2): 353-363.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.02.012

进一步造成河流两岸的滑坡不稳定。

另外,滑坡形变的监测是研究滑坡稳定性的重要手段,常见的方法有实地监测、位移计监测、D-InSAR 技术^[12]与 SBAS-InSAR 技术^[13]等。其中,InSAR 技术由于其覆盖范围广、可穿透云层、全天候工作,并获取毫米级形变监测的优势,在滑坡形变研究中得到应用广泛^[14-15]。如冯文凯等^[16]基于 SBAS-InSAR 技术对金沙江流域老滑坡进行时序形变监测,将监测结果与实际工程地质调查结果进行对比,得出老滑坡的形变趋势与 SBAS-InSAR 的时序结果具有较强的一致性,表明 SBAS-InSAR 技术在山地滑坡形变研究中的有效性。也有学者基于哨兵(Sentinel)影像与 SBAS-InSAR 技术对天水市活动性滑坡进行监测与识别,并通过野外调查验证 SBAS-InSAR 技术在该地区进行形变计算的准确性与可靠性^[17]。

针对河岸边坡的稳定性识别与变化规律的问题,本文选取甘肃省天水市牛头河沿岸的清泉村滑坡为研究对象进行滑坡形变与水位变化关系分析,以探究该滑坡的形变规律,便于指导灾害预警。基于前人经验,本文选用 SBAS-InSAR 技术,利用时序 Sentinel-1A 影像进行滑坡形变分析,以获取清泉村滑坡的形变速率。研究中的时序水位通过 Sentinel-2 影像,基于 MNDWI、OSTU 阈值分割^[18-19]技术

并结合 DEM 进行逐月提取。将牛头河沿岸的清泉村滑坡的形变速率与时序水位变化数据进行关联分析与相关性分析,揭示清泉村滑坡的形变与水位变化之间的关系,以期为河流侵蚀型滑坡的稳定性研究提供新的研究方向,并为该类型滑坡的早期灾害预警提供理论支撑与现实参考。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

清泉村滑坡位于天水市清水县牛头河南岸,距离清水县清泉村约 300 m,滑坡区出露地层主要为下古生界牛头河群,岩性为中—细粒片岩与片麻岩,地表出露黄土、残积层碎石土等。滑坡体平均长宽分别为 99 m 和 110 m,面积约 10890 m²,整体坡度为 26°~43°。根据坡度分布与现场调查可知,清泉村滑坡后缘陡壁清晰,滑坡中部发育有小区域破解体平台(图 1)。根据坡度图与现场调查可将清泉村滑坡分为滑缘区、平台区与前缘强变形区 3 个区域。

滑缘区的基本特征:清泉村滑坡的滑缘区的高程范围为 1306~1314 m,坡度为 30°~36°,该滑坡的后缘陡坎高度约为 3~5 m。平台区的基本特征:清泉村滑坡的平台区地势平缓,主要分布在高程 1290~1306 m,其坡度范围为 26°~36°,是该滑坡的

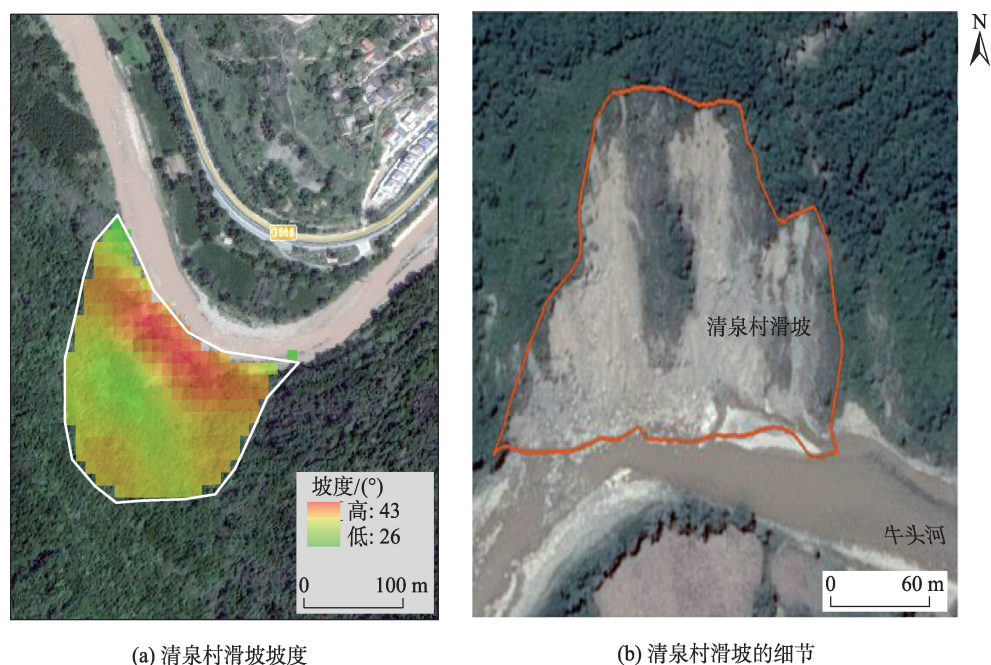


图1 清泉村滑坡示意图
Fig.1 Map of the study area

相对稳定区。前缘强变形区的基本特征：清泉村滑坡堆积区的中下部为前缘强变形区，高程约为1253~1290 m，坡度范围为36°~43°，前缘强变形区作为清泉村滑坡体的主要组成部分，目前正处在蠕滑变形阶段。

1.2 研究数据

滑坡形变监测与河流水位分别通过时序 Sentinel-1A 与时序 Sentinel-2 数据获取。Sentinel-1A 雷达卫星影像包括4种成像模式：超宽幅、波段、条带、干涉宽幅，其中干涉宽幅模式是 Sentinel-1A 的主要数据拍摄模式，根据研究区所在位置，通过数据集，获取成像时间、成像模式以及数据类型，筛选出本次实验所需的24景 Sentinel-1A 数据，所选数据均为从南向北飞的升轨右视数据，数据类型均为 Level-1 的单视复数影像(SLC)，Sentinel-1A 的数据参数如表1所示。

研究区的牛头河为山区细小河流，山体阴影与遥感数据的分辨率将分别干扰 Sentinel-1A 与 Landsat 8 的水体提取精度^[20-21]，因此，本次实验选取时序 Sentinel-2 光学影像(Sentinel-2)进行研究区水体提取。Sentinel-2 携带一枚多光谱成像仪(MSI)可进行多光谱成像，这使得该数据被广泛应用于水体提取、植被监测等实验^[22-23]。Sentinel-2 具有13个光谱波段，幅宽达290 km，地面分辨率有10 m、20 m 和60 m，可基于10 m 波段重采样提高影像分辨率，本文所用的 Sentinel-2 影像数据参数如表1所示。

除了哨兵系列影像，此次研究中还利用了12.5 m 的 ALOS PALSAR DEM 与 GPM_3IMERGM 降雨

数据进行研究分析。实验中通过12.5 m 的 ALOS 的 DEM 结合水体指数等完成时序水位获取，该 DEM 来自于日本的 ALOS 对地观测卫星，其所搭载的 PALSAR 传感器具有高分辨率、扫描式合成孔径雷达与极化3种观测模式，使其生成的 DEM 精度为12.5 m，较适合于本文山区细小河流水位提取研究。为补充说明研究区水位季节变化对滑坡形变的影响，基于 Google Earth Engine (GEE) 平台利用月尺度的 GPM_3IMERGM 降雨数据产品获取研究区时序降雨变化曲线，将其与时序水位、滑坡形变速率进行关联分析，对比时序降雨与时序水位变化对清泉村滑坡的影响。该降雨数据源于 NASA 的全球降水测量实验利用卫星，主要有3个级别，本文所用为第三级别的月降雨数据，具体参数如表1所示。

2 研究方法 with 数据处理

2.1 滑坡位移的研究方法

本文基于 SBAS-InSAR 方法进行清泉村滑坡的位移研究，该方法的核心思想是利用短基线的 SAR 数据集形成干涉像对，经消除轨道、地形等残差相位等处理，利用奇异值分解(SVD)方法得出高相干点的形变速率，并由此得到时序平均形变速率和累积形变量^[24-26]。SBAS-InSAR 方法主要通过相位观测与数学模型来得到时序地表形变^[13]，通过选择一景主图像进行配准，并基于适当的时空基线阈值，生成若干干涉图。经平地相位、大气相位与地形相位去除后，基于观测前后两景影像生成的 $\Phi(T_A, X, L)$ 相位和 $\Phi(T_B, X, L)$ 相位，得到像素点处的干涉相位 $\sigma_q(X, L)$ ^[27]。利用 SBAS-InSAR 技术使用奇异值分解法(SVD)通过多个小基线，根据合成孔径雷达采集之间的时间间隔，计算出相应的形变时间序列。

实验采用 SBAS-InSAR 技术，基于 Gamma 软件将2015年4月2日影像视为主影像，并设置时间与空间基线阈值进行干涉对组合，获取研究区的形变速率与累积形变量，主要包含以下过程：①以2015年4月2日的 SAR 影像为主影像，对其他影像进行精配准处理；②去除地形相位，对干涉图进行自适应滤波处理，提高相干性；③进行相位解缠处理，并在去除大气相位后，基于奇异值分解法解算目标点的时序形变；④对结果进行地理编码，具体操作流

表1 数据影像参数信息
Tab.1 Image parameters

影像名称	影像信息	说明
Sentinel-1A	数据类型	IW SLC
	升降轨	Ascending
	极化方式	VV
	影像时间段	2015年4月—2020年9月
	影像数量	24景
Sentinel-2	空间分辨率	10 m(4个波段)、20 m(6个波段)、60 m(3个波段)
	宽幅	290 km
	视场	20.6°
	影像时间段	2015年6月—2020年9月
	影像数量	52景
ALOS PALSAR DEM	空间分辨率	12.5 m
GPM_3IMERGM	空间分辨率	0.1° × 0.1°

程如图2所示。

2.2 河流水位提取的研究方法

水体指数是遥感影像进行水体识别的重要工具,常见的水体指数有归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)与归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)^[22,28]。王大钊等^[21]在实际应用中发现,MNDWI对于水体的识别精度为96.74%,要优于NDWI的精度(94.24%)。因此,选取识别精度较优的MNDWI进行清泉村滑坡坡脚的牛头河水体提取,MNDWI的计算公式如下:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{MIR}}{\text{Green} + \text{MIR}} \quad (1)$$

式中:Green、MIR分别代表可见光波段中的绿光波段与中红外波段的反射率。经水体指数计算后,利用OSTU阈值分割提取出水体^[18-19],并结合线性模型进行混合像元分解^[29-30],减少因混合像元造成的水体提取误差,再借助DEM数据与时序坡脚中点进行时序水位获取,具体流程如图3所示。

河流水位数据获取的关键步骤如下:①基于重采样后的影像进行归一化差异水体指数(MNDWI)计算;②利用OSTU阈值分割进行水体提取,并借助线性模型进行像元分解优化水体边界提取效果;③选取清泉村岸边中心点为参照,叠加12.5 m的DEM进行月尺度的坡脚河流水位信息获取(图4)。

3 实验结果分析与讨论

3.1 滑坡位移结果

基于上文介绍的SBAS-InSAR技术,对覆盖清泉村滑坡区域的24景Sentinel-1A数据进行分析,得到了2015年4月至2020年9月期间清泉村滑坡地表形变结果。图5为基于SBAS-InSAR技术所获取的清泉村滑坡累积形变图,从累计形变量的空间分布情况可知,清泉村滑坡所在区域处于不均匀形变状态,区域内的年累积形变量范围在-0.787~-7.430 cm,且清泉村滑坡底部的累计形变量较大,其空间分布呈现出随坡体海拔降低形变量逐渐增大的趋势。

地面目标点的累积形变变化趋势是判断坡体是否存在加速运动现象的重要参考,可有效辅助于滑坡稳定性研究。为进一步分析清泉村滑坡的变形破坏模式,分别沿清泉村滑坡的滑动方向与临近牛头河的坡体底部选取纵剖面线A-A',横剖面线B-B'进行坡体累积形变量分析(图5)。在A-A'剖面线上选取点P1、P2、P3,在B-B'剖面线上选取点Q1、Q2、P3、Q3、Q4绘制清泉村滑坡的累积形变曲线(图6)。其中,P1、P2、P3分别选自滑坡主运动方向的顶部、中部与边坡底部,Q1与Q4位于清泉村滑坡外部,Q2与Q3位于清泉村滑坡前缘弱变形区,2条剖面线交汇于目标点P3处。

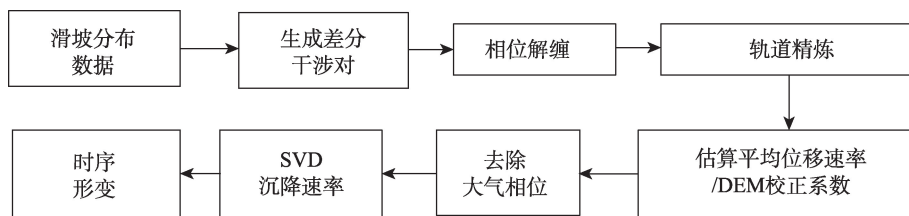


图2 SBAS-InSAR数据处理流程
Fig.2 SBAS-InSAR data processing flow

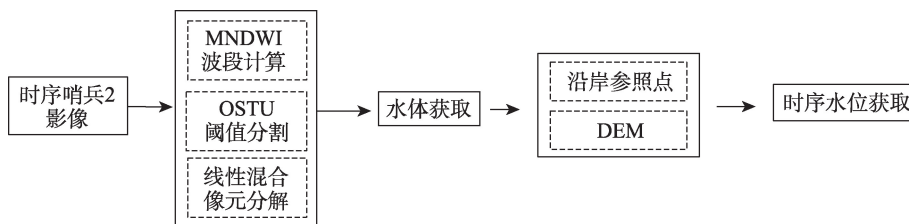


图3 基于哨兵2与DEM的水位信息获取流程
Fig.3 Flow of water level information acquisition based on Sentinel-2 and DEM

图6a为滑坡主运动方向的累积形变曲线,点P1位于坡体中后部,该点的累积形变量为 -29.03 mm;P2为中部地区,累积形变量为 -44.96 mm。图6b为临近牛头河的坡体底部累积形变曲线,点Q1与Q4位于坡体外部,其累积形变量分别为 -12.65 、 -16.36 mm;点Q2与Q3位于边坡底部的前缘弱变形区,其累积形变量分别为 -50.88 、 -35.72 mm;P3处临近坡脚地区,累积形变量最大,达到 -70.39 mm。通过对比目标点的累积形变量发现,清泉村滑坡的累积形变量分布不均匀,在纵向上呈现出由坡顶到坡底形变量逐渐变大的趋势,在滑坡前缘强变形区累积形变量达到最大;在横向上呈现出累积形变量由滑坡边缘向滑坡中心逐渐变大的趋势,即边坡底部越靠近主滑动方向的区域累积形变量越大。结合图6坡体的累积形变与实地调查可知,清泉村滑坡处于蠕滑运动中,其累积形变量呈现出在

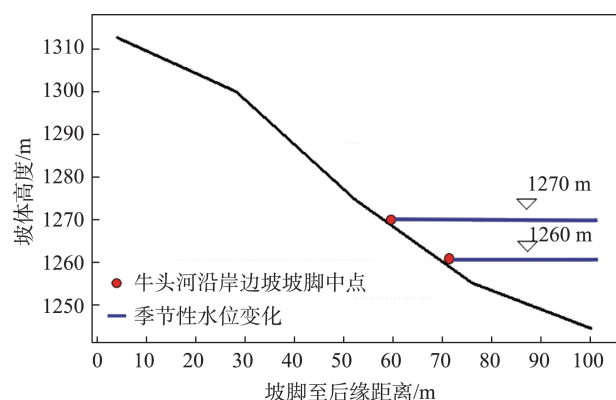


图4 坡脚参照点与DEM进行水位提取示意图

Fig.4 Schematic diagram of water level extraction based on slope toe reference point and DEM

主滑动方向上,越临近牛头河的地区,坡体稳定性越差,累积形变量越大。

3.2 河流水位提取结果

基于哨兵2号光学影像和MNDWI水体指数与OSTU阈值分割法,以滑坡坡脚中间点为参照,借助研究区12.5 m的DEM进行河流水位提取。图7为基于2019年8月哨兵2影像所生成的牛头河水体结果。

为检验本研究中水位的提取效果,选取距清泉村滑坡最近的北道水位站(34.561°N 、 105.898°E),通过对比水位站的实测数据与本文方法所提取的时序水位数据,分析本文所用水位提取方法的有效性。北道水位站是天水市麦积区对渭河的实时水位监测站,其位于清泉村西南处,距清泉村滑坡约

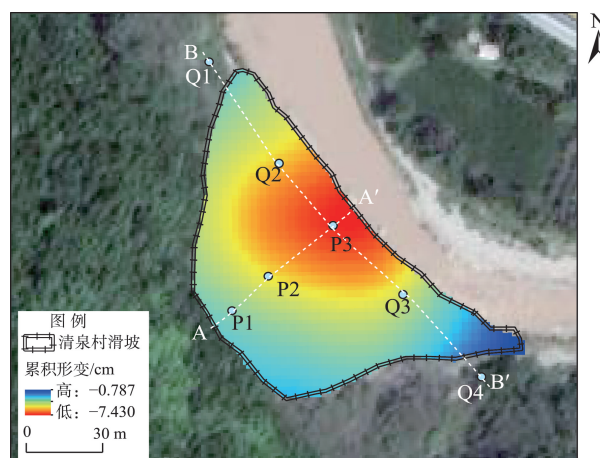


图5 清泉村滑坡视线方向的累积形变图

Fig.5 Cumulative deformation of the LOS direction of the landslide at Qingquan Village

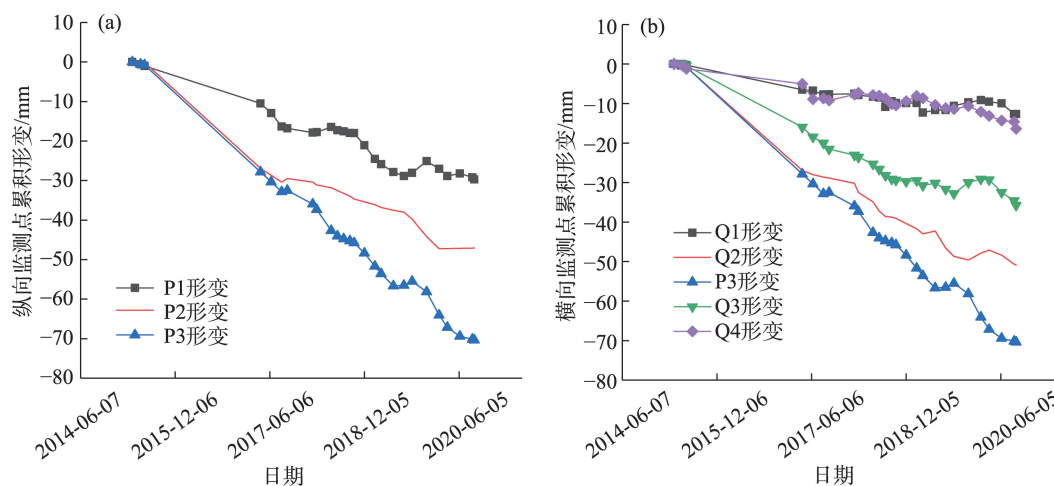


图6 清泉村滑坡目标点的累积形变量曲线

Fig.6 Cumulative deformation curve of the target point of the landslide at Qingquan Village

17 km。利用水体指数与DEM基于哨兵2影像获取该站点观测处的时序水位数据,将提取的水位结果与该站点的实测水位数据进行对比,分析本文所用的水位提取方法的合理性。基于哨兵2数据获取的时序水位与北道实测水位对比结果,如表2所示。



图7 2019年8月牛头河水体提取结果
Fig.7 Results of water body extraction for the Niutouhe River in August 2019

从表2可知,基于哨兵2提取的水位与水位站实测值的高程配置误差范围在1.52~3.90 m,二者在水位变化趋势上具有一致性,可以认为哨兵2提取的水位具有较好的准确性。对于山区细小的牛头河流域,缺乏实时监测的水位站,无法直接获取长时序连续水位季节变化研究。通过与北道水位站的实测数据进行对比得出,本文所用的哨兵2时序水位方法在提取结果误差较小,对于缺乏水位站的山区细小河流的时序水位观测具有适用性。

基于时序水位变化曲线可知(图8),清泉村坡脚

表2 哨兵2观测水位与北道水位站结果对比
Tab.2 Comparison of Sentinel-2 observed water levels and results from the North Road water level station

时间	哨兵2提取水位/m	实测水位/m
2018-04	1079	1075.43
2018-05	1079	1075.63
2018-06	1079	1075.60
2018-07	1080	1078.48
2018-08	1080	1076.10
2018-09	1079	1075.50
2018-10	1079	1075.23

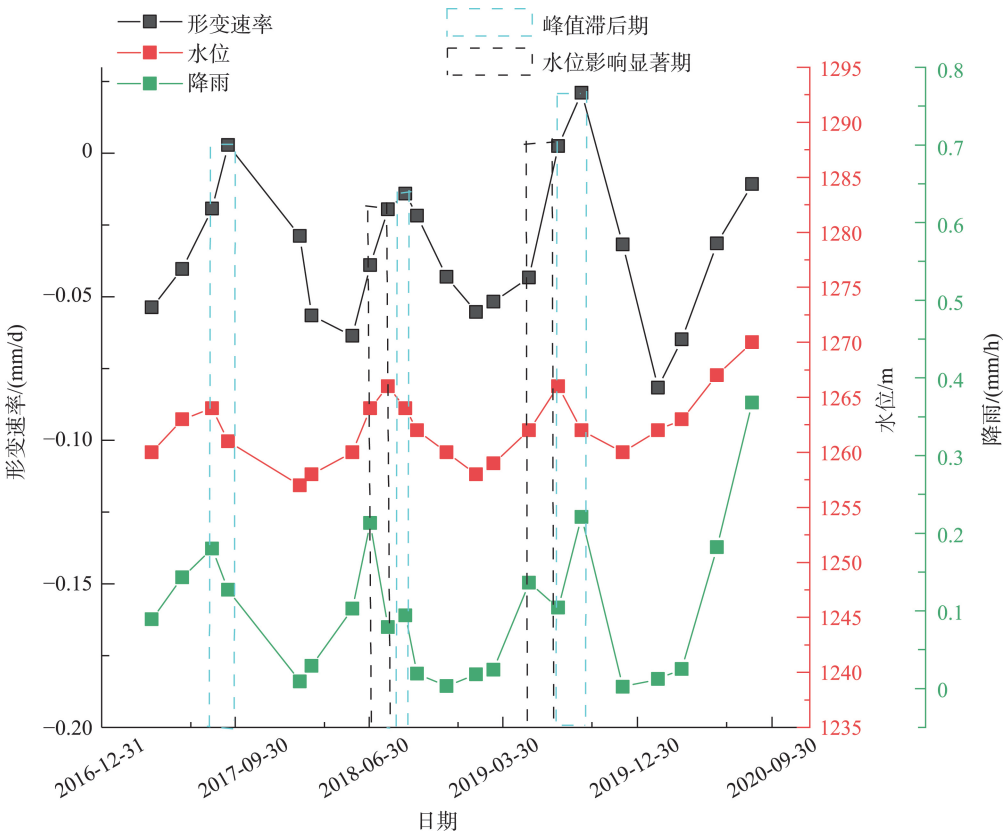


图8 清泉村滑坡形变速率与河流水位、降雨时序变化
Fig.8 Rate of landslide deformation in Qingquan Village versus river level and rainfall time series

河流水位具有明显的干湿季变化特点,年际水位最低值在每年的1月前后,水位最高值在每年的7月前后。为更好地说明时序水位的季节变化情况,在研究中增加基于GEE平台获取的GPM时序月降雨变化趋势进行补充说明,该降雨数据的时序变化趋势与气象站插值结果的变化趋势较为一致,具有一定的科学性。由图8可见,2017—2019年年际水位差异较小,2020年雨季水位相比于前3年显示出明显的抬升,这一结果与2020年的降雨量明显高于前3年相关。将2017—2020年清泉村滑坡LOS视线方向的形变速率与坡脚时序水位数据、时序降雨数据进行关联分析,根据图8线性关联统计图对比分析发现,清泉村滑坡的形变速率与坡脚牛头河水位季节变化存在较强相关性。

从图8时序变化曲线图可知,清泉村滑坡形变速率与时序水位,时序降雨具有明显的年际变化特征。在2017—2020年雨季,随着降雨量的增多,牛头河水位抬升,清泉村滑坡的形变速率逐渐加快,水位的季节变化是扰动清泉村滑坡稳定性的重要原因;对比年际滑坡形变峰值与年际水位变化峰值,发现坡体形变速率的年峰值具有滞后于水位峰值1~2个月的特点(图8蓝色虚线区域);在2017—2020年旱季,随着河流水位降低,清泉村滑坡的形变速率逐渐下降。特别地,在2018年7月与2019年6月呈现出降雨量下降、河流水位抬升、边坡形变速率抬升的状况(图8黑色虚线区域),表明滑坡的形变速率没有因降雨的减少而放缓,该地区边坡水位变化对滑坡形变的影响更加显著。为量化分析水位变化对滑坡形变的影响,基于时序降雨、时序水位与滑坡形变速率进行皮尔森相关性分析与显著性检验^[31-32],分析水位季节变化与时序降雨对清泉村滑坡稳定性的影响(表3)。坡脚水位季节变化与清泉村滑坡形变速率的相关系数为0.46($P=0.02$);时序降雨与滑坡形变速率的相关系数为0.39($P=0.039$),表明降雨与水位变化对边坡形变均有影响,

但从相关性分析结果来看,水位的变化对滑坡影响相对显著。

基于上述时序结果关联分析与相关性分析发现,牛头河时序水位变化与边坡形变速率具有明显的周期性规律,时序水位变化是影响沿岸清泉村滑坡稳定性的重要原因。2017—2019年期间清泉村滑坡共有3次形变峰值,分别发生在2017年9月、2018年8月、2019年9月。与此同时,相应的水位也出现3次峰值,分别发生在2017年8月、2018年7月、2019年8月。其中,形变峰值相对水位峰值呈现出一定滞后性,表明水位变化作用边坡上需要一定的时间,这是由于黄土主要成分是粉砂,富含碳酸钙,雨季时随着牛头河水位的持续上升,流水对边坡的入渗作用加强,边坡土体遇水后抗剪强度降低、容易发生湿陷^[33-34],但这种变化需要一定的入渗时间,因此表现出了一定的滞后性。

清泉村滑坡的形变速率与坡脚牛头河时序水位具有干湿季循环变化特点,这与受水位涨落影响的消落带滑坡灾害相似^[35-37],滑坡底部边坡长期受季节性水位涨落影响,使坡体土壤处于周期性的饱和—干燥过程,导致滑坡体内孔隙水压力发生变化^[38],降低滑坡前缘土壤的稳定性与抗侵蚀能力。雨季时,随着牛头河水位的持续上升,滑坡前缘被淹没的部分逐渐扩大,流水入渗区域变大,滑体内饱和土体所占比例增大,原有非饱和部分的孔隙水压力变大^[39],导致坡体的抗滑能力降低。同时,受水位抬升期的软化作用与流水冲刷影响,滑坡前缘部分结构变松散,抗剪强度下降^[40],导致土体的稳定性变差,加剧水位抬升期流水对坡面的侵蚀作用,导致滑坡形变速率随河流水位的上涨而抬升。旱季时,坡脚沿岸水位降低,滑坡前缘被淹没的部分较少,滑坡内饱和土体所占的比例较少,边坡受河流的侵蚀作用减弱,滑坡的形变速率随之降低。由于牛头河水位的干湿季涨落变化,使得河水对沿岸边坡的泥化淹没区出现季节性变化,并导致边坡底部土壤的孔隙水压力、抗剪强度与抗侵蚀能力发生干湿季变化,进而造成河流对沿岸型黄土滑坡的侵蚀作用呈现出季节性变化。时序水位与形变速率的周期性变化特点可为河流侵蚀型黄土滑坡的稳定性研究提供新的理论支撑,并为该类型滑坡的早期预警提供科学参考。

3.3 讨论

虽然GPS与地面水准测量是滑坡运动较为精

表3 边坡形变与季节水位、时序降雨的相关系数
Tab.3 Coefficients of correlation between slope deformation and seasonal water level and rainfall time series data

指标	形变速率	时序降雨	季节水位
形变速率	1		
时序降雨	0.39	1	
季节水位	0.46	0.5	1

确的测量方法,但这些方法需要提前埋设相应的设备进行观测,而InSAR方法通过借助卫星技术能够快速获取大范围的滑坡时序形变结果,近年来随着SBAS-InSAR技术对失相干等误差的改进,使得InSAR方法在滑坡位移监测、运动趋势分析与运动规律揭示方面得到广泛应用。通过对比本文的遥感影像时序水位观测结果与水位站的实测结果发现,虽然观测结果与实测数据具有一定差距,但其时序变化趋势较为一致。因此,基于山区细小流域缺乏实测水位站的现状,本文所用方法对研究区边坡水位的时序获取上具有一定可行性。

通过分析时序边坡形变和水位的关系发现,滑坡形变的发生时间与水位抬升之间具有很强的关联性,经相关性分析发现二者具有较强正相关性。受水位涨落变化的影响,坡体的抗侵蚀能力与稳定性降低,滑坡形变速率抬升,边坡位移增大,滑坡上部的黄土物质向滑坡下部填充,使得滑坡前缘部的物质得到补充,坡面逐渐平衡,滑移速率逐步降低,坡面趋于稳定;当下一次水位上涨时沿岸黄土边坡又会出现遇水失稳与边坡位移的现象,经长期性周期反复,最终将导致黄土滑坡。

4 结论

本文以牛头河沿岸的天水市清泉村滑坡为例,基于哨兵系列影像将滑坡形变数据与河流水位变化进行关联分析,得到以下结论:

(1) 2015—2020年清泉村滑坡处于蠕滑运动状态,且滑坡区的形变速率表现出干湿季循环变化。对比坡体地面参照点形变曲线发现,清泉村滑坡处于蠕滑运动中,其累积形变量呈现出在主滑动方向上,越临近牛头河的地区坡体稳定性越差,累积形变量越大。

(2) 利用哨兵2光学影像基于MNDWI水体指数、OSTU阈值分割,并结合DEM对边坡水位数据进行逐月提取,发现水位呈现明显的季节变化,每年的峰值在雨季7月前后,低值在旱季1月前后。

(3) 通过对比2017—2020年时序水位与形变速率曲线发现,滑坡形变速率与沿岸水位变化具周期性变化,且滑坡形变量相较于河流水位变化具有一定滞后性。随着河流水位的上涨,清泉村滑坡的形变速率明显增大,在雨季时滑坡形变速率增长最快;同时,年际滑坡形变速率的峰值相比于水位峰

值要滞后一段时间。

(4) 将时序降雨、时序水位与滑坡形变进行相关性分析得出,时序水位与滑坡形变的相关性系数为0.46,时序降雨与滑坡形变的相关性系数为0.39,表明边坡形变对水位变化的响应更明显。牛头河水位具有干湿季涨落循环变化的特点,这使得河水对沿岸边坡的泥化淹没区出现季节性变化,并导致边坡底部土壤的抗剪强度与抗侵蚀能力发生干湿季变化,进而造成河流对沿岸型黄土滑坡的侵蚀作用呈现出季节性变化。

基于时序水位变化与滑坡形变的关联分析与相关性分析得出,坡脚河流水位的季节变化是引起清泉村滑坡形变的重要因素,可由此得出河流侵蚀的季节性变化对沿岸滑坡形变的影响。

致谢: 感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见以及刘洪江教授对本文结果分析方面的指导,在此一并感谢。

参考文献(References)

- [1] 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 Mao-sheng, Li Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540.]
- [2] 崔鹏.中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J].地理科学进展,2014,33(2):145-152. [Cui Peng. Progress and prospects in research on mountain hazards in China. Progress in Geography, 2014, 33(2): 145-152.]
- [3] Leng Y Q, Peng J B, Wang Q Y, et al. A fluidized landslide occurred in the Loess Plateau: A study on loess landslide in South Jingyang tableland [J]. Engineering Geology, 2018, 236: 129-136.
- [4] 彭建兵,王启耀,庄建琦,等.黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J].地质力学学报,2020,26(5):714-730. [Peng Jianbing, Wang Qiyao, Zhuang Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 714-730.]
- [5] 廖红建,盛谦,高石夯,等.库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3454-3458. [Liao Hongjian, Sheng Qian, Gao Shihang, et al. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3454-3458.]
- [6] 张茂省,胡炜,孙萍萍,等.黄土水敏性及水致黄土滑坡

- 研究现状与展望 [J]. 地球环境学报, 2016, 7(4): 323-334. [Zhang Maosheng, Hu Wei, Sun Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides. Journal of Earth Environment. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4): 323-334.]
- [7] 孙萍萍, 张茂省, 冯立, 等. 黄土水敏性及其时空分布规律 [J]. 西北地质, 2019, 52(2): 117-124. [Sun Pingping, Zhang Maosheng, Feng Li, et al. Water sensitivity of loess and its spatial-temporal distribution on the loess plateau. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 117-124.]
- [8] 王阿丹. 延安地区侵蚀作用导致的黄土滑坡形成机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012. [Wang A'dan. Study on mechanism of loess landslides caused by erosion in Yan'an District. Xi'an, China: Chang'an University, 2012.]
- [9] 刘文红. 黄土高原滑坡发育背景与成灾模式研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016. [Liu Wenhong. Study on the background and disaster modes of landslide on Loess Plateau. Xi'an, China: Chang'an University, 2016.]
- [10] 袁湘秦, 赵法锁, 段钊. 河流作用诱发黄土滑坡机理 [J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 154-160. [Yuan Xiangqin, Zhao Fasuo, Duan Zhao. Mechanism of loess landslide induced by river action. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 154-160.]
- [11] 张吉宏, 段钊, 唐皓. 蠕变对河流侧蚀型黄土滑坡影响的数值模拟 [J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 142-146. [Zhang Jihong, Duan Zhao, Tang Hao. Numerical simulation of the effect of creep on loess landslide caused by lateral river erosion. Yellow River, 2020, 42(2): 142-146.]
- [12] Cascini L, Fornaro G, Peduto D. Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales [J]. Engineering Geology, 2010, 112: 29-42.
- [13] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [14] 安炳琪, 罗海滨, 丁海勇, 等. 基于SBAS-InSAR技术的西宁地表形变监测 [J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 838-846. [An Bingqi, Luo Haibin, Ding Haiyong, et al. Monitoring of Surface deformation in Xining based on SBAS-InSAR. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 838-846.]
- [15] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [16] 冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 基于SBAS-InSAR技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 384-393. [Feng Wenkai, Dun Jiawei, Yi Xiaoyu, et al. Deformation analysis of Woda Village old landslide in Jinsha River Basin using SBAS-InSAR technology. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 384-393.]
- [17] 姚佳明, 姚鑫, 刘星洪, 等. InSAR技术的天水市活动性滑坡灾害识别与分析 [J]. 测绘科学, 2022, 47(1): 121-132. [Yao Jiaming, Yao Xin, Liu Xinghong, et al. Identification and analysis of active landslide disaster in Tianshui City using InSAR technology. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(1): 121-132.]
- [18] 宋森森, 贾振红, 杨杰, 等. 结合OSTU阈值法的最小生成树图像分割算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(9): 178-183. [Song Sensen, Jia Zhenhong, Yang Jie, et al. Image segmentation algorithm of minimum spanning tree combined with OSTU threshold method. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(9): 178-183.]
- [19] 赵紫薇. 基于OSTU算法利用新型水体指数进行Landsat数据自适应阈值水体自动提取研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(9): 57-60. [Zhao Ziwei. A new water index extracting water information automatically from landsat based on OSTU. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(9): 57-60.]
- [20] 周晗, 叶虎平, 魏显虎, 等. 基于Sentinel-1/2的水体提取方法对比研究: 以斯里兰卡小型水体为例 [J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(6): 794-802. [Zhou Han, Ye Huping, Wei Xianhu, et al. Comparative study on water extraction methods based on Sentinel-1/2: A case study of small water body in Sri Lanka. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(6): 794-802.]
- [21] 王大钊, 王思梦, 黄昌. Sentinel-2和Landsat 8影像的四种常用水体指数地表水体提取对比 [J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 157-165. [Wang Dazhao, Wang Simeng, Huang Chang. Comparison of Sentinel-2 imagery with Landsat 8 imagery for surface water extraction using four common water indexes. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(3): 157-165.]
- [22] 姚杰鹏, 杨磊库, 陈探, 等. 基于Sentinel-1, 2和Landsat 8时序影像的鄱阳湖湿地连续变化监测研究 [J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 760-776. [Yao Jiepeng, Yang Leiku, Chen Tan, et al. Consecutive monitoring of the Poyang Lake wetland by integrating sentinel 1-2 with sentinel-1 and landsat 8 data. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 760-776.]
- [23] Cordeiro M C R, Martinez J M, Peña-Luque S. Automatic water detection from multidimensional hierarchical clustering for Sentinel-2 images and a comparison with Level 2A processors [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 253: 112209. doi: 10.1016/j.rse.2020.112209.

- [24] Yao J M, Lan H X, Li L P, et al. Characteristics of a rapid landsliding area along Jinsha River revealed by multi-temporal remote sensing and its risks to Sichuan-Tibet railway [J]. *Landslides*, 2022, 19(3): 703-718.
- [25] Dong S C, Samsonov S, Yin H W, et al. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(3): 677-691.
- [26] Cianflone G, Tolomei C, Brunori C A, et al. Landslides and subsidence assessment in the Crati Valley (Southern Italy) using InSAR data [J]. *Geosciences*, 2018, 8(2): 67. doi: 10.3390/geosciences8020067.
- [27] Galve J, Pérez-peña J, Azañón J, et al. Evaluation of the SBAS InSAR service of the European space agency's Geohazard Exploitation Platform (GEP) [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1291-1312.
- [28] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595. [Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index(MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595.]
- [29] 刘成, 王丹丽, 李笑梅. 用混合像元线性模型提取中等植被覆盖区的粘土蚀变信息 [J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(2): 95-98. [Liu Cheng, Wang Danli, Li Xiaomei. Extracting clay alteration information of medium vegetation covered areas based on linear model of spectral mixture analysis. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(2): 95-98.]
- [30] 金鑫, 柯长青. 基于混合像元分解的天山典型地区冰雪变化监测 [J]. *国土资源遥感*, 2012, 24(4): 146-151. [Jin Xin, Ke Changqing. Monitoring of snow cover changes in Tianshan Mountains based on mixed pixel decomposition. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012, 24(4): 146-151.]
- [31] 周永健, 冯文凯, 易小宇, 等. 木鱼包滑坡变形与库水位相关性量化分析 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(27): 11544-11550. [Zhou Yongjian, Feng Wenkai, Yi Xiaoyu, et al. Quantitative analysis of correlation between deformation and reservoir water level of Muyubao landslide. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(27): 11544-11550.]
- [32] 尚敏, 廖芬, 马锐, 等. 白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性量化分析研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(3): 742-750. [Shang Min, Liao Fen, Ma Rui, et al. Quantitative correlation analysis on deformation of Baijiabao landslide between rainfall and reservoir water level. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 742-750.]
- [33] 慕焕东, 邓亚虹, 李荣建. 干湿循环对地裂缝带黄土抗剪强度影响研究 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(5): 1131-1138. [Mu Huandong, Deng Yahong, Li Rongjian. Experimental study on strength characteristics of loess at ground fissures in Xi'an under action of dry and wet cycle. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(5): 1131-1138.]
- [34] 李保雄, 苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 1003-1008. [Li Baoxiong, Miao Tiande. Research on water sensitivity of loess shear strength. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 1003-1008.]
- [35] 朱赛楠, 殷跃平, 黄波林, 等. 三峡库区大型单斜顺层新生滑坡变形特征与失稳机理研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(3): 657-667. [Zhu Sainan, Yin Yueping, Huang Bolin, et al. Deformation characteristics and instability mechanism of large monoclinical layered neogenic bedrock landslide in Three Gorges Reservoir area. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 657-667.]
- [36] 周永娟, 仇江啸, 王效科, 等. 三峡库区消落带崩塌滑坡脆弱性评价 [J]. *资源科学*, 2010, 32(7): 1301-1307. [Zhou Yongjuan, Qiu Jiangxiao, Wang Xiaoke, et al. A vulnerability assessment of landslide in water-level-fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir. *Resources Science*, 2010, 32(7): 1301-1307.]
- [37] 张鹏, 张森林, 黄波林, 等. 岸坡消落带岩体劣化的新生型滑坡(崩塌)隐患演化模式研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5): 1416-1426. [Zhang Peng, Zhang Senlin, Huang Bolin, et al. Study on the evolution model of neogenic landslide (collapse) hazards in rock mass of hydro-fluctuation belt. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(5): 1416-1426.]
- [38] Song K, Wang F W, Yi Q L, et al. Landslide deformation behavior influenced by water level fluctuations of the Three Gorges Reservoir (China) [J]. *Engineering Geology*, 2018, 247: 58-68.
- [39] 赵萌. 三峡库区黄土坡滑坡滑带土特性及失稳机理研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2021. [Zhao Meng. Study on characteristics of slip zone soil and failure mechanism of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area. Wuhan, China: China University of Geosciences, 2021.]
- [40] 邓华锋, 肖瑶, 方景成, 等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(9): 2629-2638. [Deng Huafeng, Xiao Yao, Fang Jingcheng, et al. Shear strength degradation and slope stability of soils at hydro-fluctuation belt of river bank slope during drying-wetting cycle. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(9): 2629-2638.]

Relationship between loess landslide deformation and river water level based on time series remote sensing images:

A case study of the Qingquan Village landslide in Tianshui City

YUN Yihan^{1,2}, ZHANG Mingbo¹, WU Yuming^{1*}, YAO Jiaming¹

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The erosion effect of rivers on the bank slopes is one of the important factors in the destabilization of loess landslides. Exploring the impact of seasonal changes of river water level on the stability of slopes is important for disaster early warning. The study utilized remote sensing techniques to examine the relationship between the rate of deformation of coastal slopes and seasonal changes in water levels over a five-year period, using the landslide in Qingquan Village, Tianshui City, Gansu Province as a case study. The time series deformation data of the landslide was obtained based on SBAS-InSAR technology, the time series water level data at the bottom of the slope was obtained using MNDWI and DEM, and the time series rainfall data of the study area was obtained through GPM. By comparing the river water level, time series rainfall, and landslide deformation rate curves, we found that as the rainfall increased and the river water level rose, the deformation rate of the Qingquan Village landslide increased significantly, and the landslide deformation rate increased the most during the summer season. In particular, the peak of the slope deformation rate has a certain lag compared to the peak of the water level. The coefficient of correlation between water level and landslide deformation was 0.46, and that between rainfall and landslide deformation was 0.39, indicating that the degree of response of the landslide in Qingquan Village to changes in water level was more pronounced. The seasonal change of river water level causes the seasonal change of river erosion on erosive landslides. The seasonal relationship between the deformation of loess landslides and the water levels of rivers is vital in understanding the evolution of riverbank slopes, recognizing landslides, and preventing disasters.

Keywords: erosive landslide; landslide deformation; water level; correlation; loess landslide