第 56 卷 第 3 期 2023 年 (总 229 期) 西北地质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 56 No. 3 2023(Sum229)

DOI: 10.12401/j.nwg.2023086

基于时序 InSAR 的黄土滑坡隐患早期识别

——以白鹿塬西南区为例

张林梵

(陕西铁道工程勘察有限公司,陕西西安 710043)

摘 要:中国黄土滑坡灾害频发且分布广泛,传统的地质灾害调查对于地处高位、形变特征不明显和隐蔽型的滑坡隐患难以有效识别,是滑坡灾害监测预警成功率低的主要原因之一。如何有效超前判识别地质灾害隐患是地质灾害防治工作的前提和基础,时序InSAR技术在此领域具有良好的应用潜力,但如何更好地将InSAR技术融入到滑坡灾害相关研究中仍处于探索阶段。笔者以西安市白鹿塬西南区为研究区,在高精度三维倾斜摄影、ALOS-2 雷达影像集等数据基础上,以时序InSAR技术反演得到104处地表形变明显区域;结合黄土滑坡易发指数、航拍影像和野外核查,快速识别黄土滑坡及隐患23处,其中包括新识别的滑坡隐患20处和在册的滑坡灾害3处,通过与传统地灾调查数据比对和实地调查核实验证了时序InSAR方法探测结果的优势和有效性,并构建了基于高精度InSAR和DEM数据的黄土滑坡隐患早期识别方法。 关键词:黄土滑坡;早期识别;时间序列InSAR;易发性指数;形变测量

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2023)03-0250-08

Early Identification of Hidden Dangers of Loess Landslide Based on Time Series InSAR: A Case Study of Southwest Bailuyuan

ZHANG Linfan

(Shaanxi Railway Engineering Survey Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: Loess landslide disasters occur frequently and are widely distributed in China. Traditional geological hazard surveys are difficult to effectively identify hidden landslide hazards that are located at high altitudes, have unclear deformation characteristics, and are hidden. This is also one of the main reasons for the low success rate of landslide hazard monitoring and warning. How to effectively identify geological hazard hazard beyond prejudgment is the premise and foundation of geological hazard prevention and control work. Time series InSAR technology has good application potential in this field, but how to better integrate InSAR technology into landslide disaster related research is still in the exploratory stage. The author takes the southwest area of Bailuyuan in Xi'an City as the research area, and on the basis of high–precision 3D oblique photography, ALOS-2 radar image set, and other data, uses time-series InSAR technology to invert 104 areas with obvious surface deformation. By combining the susceptibility index of loess landslides, aerial images, and field verification, 23 loess landslides and hidden dangers were quickly identified, including 20 newly identified landslide hazards and

收稿日期: 2022-12-01;修回日期: 2023-04-12;责任编辑: 贾晓丹

基金项目:西安市地质灾害综合防治体系建设"白鹿塬西南坡风险调查评价"(ZLC-SX-2021014)资助。

作者简介:张林梵(1996-),男,硕士,助理工程师,主要从事工程勘察与灾害防治工作。E-mail: 274768033@qq.com。

3 registered landslide disasters. The advantages and effectiveness of the time-series InSAR method detection results were verified through comparison with traditional geological disaster investigation data and on-site investi-

gation verification. A high-precision InSAR and DEM data based early identification method for loess landslide hazards was constructed.

Keywords: loess landslide; early identification; time series InSAR; vulnerability index; deformation measurement

中国是世界上最大的黄土分布区,黄土作为第四 纪主要以风力搬运而成的粉粒堆积物,因其独特的水 敏性和脆弱的结构,使得黄土地区的黄土滑坡灾害频 发且分布广泛(Lin et al., 2021; 孙萍萍等, 2022)。近 20年间,中国开展了系统全面的地毯式、拉网式地质 灾害排查,建立了较为完善的群测群防体系。然而, 灾难性的黄土滑坡灾害时有发生,如2019年3月15 日山西省临汾市乡宁县枣岭乡发生了黄土滑坡,造成 20人死亡、13人受伤,直接经济损失713.48万元。调 查结果表明,乡宁"3.15"山体滑坡属中深层黄土滑 坡, 仅采用人工调查或"遥感解译+人工调查"的手 段很难发现或认定此类地质灾害隐患。传统的人工 调查很难提前发现具有高位的、隐蔽性的、发育特征 不明显的灾害隐患,例如,灾害源区位于高山中上部、 人迹罕至之类的区域,调查人员无法到达且关注度不 够。因此,如何尽早发现和有效识别出重大地质灾害 的潜在隐患并加以主动防治,是地质灾害防治领域研 究的热点(许强等,2019)。

滑坡的孕育、发展至破坏过程中伴随着多种实时 变化且可测量的物理力学信息,通过多种手段对微观、 宏观变量信息进行持续监测记录,分析滑坡灾害灾变 前兆、破坏过程中的变量信息规律性,就有可能实现 滑坡隐患的预警和识别(张毅,2018)。在众多的变量 信息中,地表变形信息是变形斜坡内部其他变量信息 变化的集中表现,相较于其他变量信息更为直观,且 滑坡演化的不同阶段地表变形有其特定的变化趋势, 这一规律为预测滑坡隐患可能发生的位置、概率和范 围搭建了以地表变形信息为纽带的新方法。

合成孔径雷达使用具有较强穿透力的微波,可以 穿透遮挡的云雾,具备高分辨率、全天时和全方位观 测成像的优点(廖明生等,2014),能够捕捉到地表微 小的形变信息,近年来其广泛用于区域地表沉降、火 山运动和冰川漂移监测等。张路等(2018)以传统时 序 InSAR 方法在四川丹巴识别出了 17 处持续变形的 滑坡隐患,通过实地调查与外部数据比对验证了识别 结果的有效性; 周超(2018)应用时序 InSAR 技术反演 三峡库区地表形变信息, 结合历史滑坡数据与野外验 证, 发现了合成孔径雷达在地表形变监测中的可靠性, 能有效对黄土滑坡进行早期识别。陈思名(2022)基 于 GNSS 与 InSAR 技术, 通过优化 SAR 识别黄土滑坡 隐患的关键参数, 一定程度上解决了黄土丘陵区植被 覆盖率高、地形复杂、早期识别难度大等问题。黄土 滑坡隐患发生的坡体区域在 SAR 影像中像元的散射 体并不明显, 但在一定的时间内其滤波相位具有良好 的相干性, StaMPS SBAS 算法按照短时空基线原则组 合生成多组主影像的序列干涉图, 尽可能减小视角差 异造成的时空不相干, 更适用于自然场景的形变探测。 Zhang 等(2022)在复杂的土地覆盖区使用改良的 StaMPS SBAS 算法, 结果表明该算法可以提供更多的 变形细节。

上述研究成果均表明, InSAR 技术在滑坡早期识 别具有良好的适用性。但是,因 InSAR 技术对坡体进 行的形变分析无法具象描述地形及坡体信息,如何有 效利用 InSAR 技术来衡量黄土边坡的变形状态、发展 阶段,有效提高黄土滑坡早期识别的精度和时效性, 仍处于探索阶段。针对这一问题,笔者选取西安市白 鹿塬西南区的黄土斜坡为研究对象,以黄土滑坡易发 指数来表示斜坡单元的不稳定程度,结合时序 In-SAR 反演的地表形变信息,可以快速搜寻定位不稳定 的斜坡区域,并采用地表形变信息简化斜坡稳定性和 活动性的评价标准,构建了基于高精度 InSAR 和 DEM 数据的黄土滑坡隐患早期识别方法。

1 研究区概况、数据来源及其处理 流程

1.1 研究区概况

研究区位于白鹿塬西南区(图1),是长安区、灞 桥区、蓝田县三区县交界之地。第四纪新构造运动继 承了第三纪末期以骊山为中心的掀斜式间歇隆起运 动,导致白鹿塬成为一个强烈抬升的黄土台塬,从而 加剧了灞河、浐河及鲸鱼沟的侵切作用(惠明强, 2020)。境内海拔最低为360m、最高为770m。塬面 东北高、西南低,塬北与灞河高差为300m左右,塬南 与浐河高差约为200m,塬内沟谷发育,侵蚀切割作用 明显,塬边斜坡主要为黄土堆积物,大孔隙、垂直节理 发育,疏松易变、强度较低,区内黄土地层之下的第三 纪红黏土和第四纪黄土地层中所夹的红褐色古土壤 常常是滑坡的滑面(图2)。白鹿塬内沟道两侧高差较 大的黄土边坡、人类工程活动较强的山前冲洪积扇裙 和黄土丘陵隆起区分布着众多黄土滑坡灾害,对当地 居民生命财产安全构成较大威胁。



图 1 白鹿塬西南区地理位置图 Fig. 1 Geographical location map of the southwest district of Bailuyuan



Fig. 2 Geological profile of Bailuyuan

1.2 监测数据

实验数据采用了研究区 2020 年 1 月到 2021 年 9 月期间,共 19 景 ALOS-2 影像数据(图 3), ALOS-2(大 地 2 号)的 L 波段穿透性高,最小分辨率为 1 m(方位 向)× 3 m(距离向),具体参数见表 1。



图 3 影像采集时间分布图



表 1 ALOS-2 数据参数表

Tab. 1ALOS-2 data parameters								
影像采集时间	影像数量	雷达波长	轨道方向	空间分辨率	视角	垂直基线分布范围	极化方式	
2020-01-18-2021-09-11	19景	23 cm	升轨	10 m	32°	91 m	HH+HV	

PALSAR-2 传感器共有 3 种成像模式包括条带式 (Stripmap)、聚束式(Spotlight)和扫描式(ScanSAR), 其中宽广的观测波段不仅对监测地表形变信息较为 迅速,也满足了区域尺度的地质灾害识别、监测预警 等。DInSAR采用二轨差分法,使用 12.5 m 分辨率的 外部 DEM 模拟 InSAR 地形相位, 剔除因地表高差变 化引起的干涉相位。据灾害普查数据统计, 研究区黄 土滑坡的规模以小型为主。为了尽可能捕捉到更多 的形变区域,数据处理全过程采用全分辨率,不采用 多视方法。

1.3 时间序列 InSAR 处理流程

时间序列 InSAR 数据处理过程分为3个步骤:生 成干涉影像图集、差分干涉处理和 StaMPS SBAS 处 理(张毅, 2018)。①结合卫星轨道参数、SRTM DEM 和研究区位置在 LiCSAR_GAMMA 中进行配准和裁 剪。②为满足 StaMPS 数据处理数量的限制要求,将 研究区范围分割为多个 Patch, 以减少单次处理的运算 量,为避免生成无效的干涉图,时间基线和空间基线 阈值分别设置为90天和50m,且各幅干涉图至多与 其前后3幅干涉图相互差分,以此生成短基线的差分 干涉图集。③应用 StaMPS SBAS 方法开展研究区的 稳定点筛选和二维相位解缠,计算得到地表形变速率 和位移时间序列。因卫星轨道与地表三位运动存在 一定的夹角, StaMPS SBAS 算法得到的地表形变速率 实际是轨道视线方向的平面投影,不能真实有效地反 映斜坡的运动特征与状态,因此需要结合斜坡朝向与 视线角将视线方向的变形速率(VLos)转化成斜坡方向 的变形速率(V_{slope}),即得到了白鹿塬西南区 2020 年1 月到 2021 年 9月期间斜坡方向的地表形变速率 (图 4)。斜坡滑动从形变数据来看,除部分滑体前缘 反翘外,斜坡原位置整体是下降的,为避免因人工建 筑、废弃物堆砌等引起的数据干扰,地表形变速率仅 保留负值。



图 4 研究区最陡坡向地表形变速率图

2 黄土滑坡隐患早期识别

滑坡灾害是孕育在一定的地质背景之下,既有自

然演变而来,如地质构造运动伴生、地震等诱发;也有 工程建设影响,如研究区普遍存在的灌溉、取土、修 建工程等(彭建兵等,2020)。滑坡孕育发展过程中引 发了相应地表形态的变化,如斜坡几何特征的改变, 且其有一定的规律可循。反过来,区域地表形变信息 所反映的地表形变状态,可用来识别滑坡孕育、发展 阶段和不稳定斜坡的变形过程,结合并分析区域地貌 特征来还原地貌演化的过程(Agliardi et al., 2013),为 区域滑坡隐患的早期识别和甄别已有滑坡复活可能 性大小提供了思路。基于以上思想,笔者结合时间序 列 InSAR、DEM、航拍影像和野外核查,在白鹿塬西 南区探索黄土滑坡隐患早期识别的技术方法。

2.1 区域形变速率聚集分析

时序 InSAR 技术得到的高形变 SDFP 点分布较散, 为了能更加直观反映形变明显的区域,为区域黄土滑 坡隐患早期识别提供便捷,应用核密度估计方法,自 动搜寻一定范围内高形变 SDFP 点的聚集区域,更加 直观地反映区域地表形变状况(图 4)。

研究区的地表形变核密度分析结果(图 5)显示, 地表形变明显区域共 104 处,集中在塬面人类工程活 动区和部分斜坡区域,排除建筑物沉降、农田灌溉、 挖方等人类工程活动引起的地表形变外,部分斜坡区 域也存在较为明显的形变迹象,该区域正是黄土滑坡 隐患早期识别关注的重点区域,主要包括尚未发生规 模性滑动的隐患灾害,也包括已有滑坡灾害的复活。



图 5 研究区地表形变核密度热点图 Fig. 5 Hot spot map of surface deformation nucleus density in the study area

2.2 基于形变速率和 DEM 的黄土滑坡易发指数

时序 InSAR 技术得到的地表形变位移信息涵盖 能够监测到的所有地表抬升与沉降,为了能快速锁定

Fig. 4 Topographic deformation rate of the steepest slope in the study area

具有形变的斜坡区域,提高黄土滑坡隐患识别的精度 与效率,采取的处理措施包括:①剔除时序 InSAR 反 演的形变量为正值的地表形变数据,有效避免了建筑 修建、堆积等引起的地表正形变。②结合黄土滑坡孕 育、演化的基础地形地貌特征,以坡高和坡度的组合 来框定斜坡区域,有效避免了塬面灌溉、人工开挖引 起的地表负值形变量。研究区约70%的形变热点区 域分布在平坦的塬面(图5),并非文中所关注的形变区。 利用白鹿塬高精度三维倾斜摄影数据,建模得 到 0.2 m 精度的数字高程模型(DEM),从 DEM 中提 取斜坡单元的坡度和坡高,统计斜坡单元不同坡度、 坡高区间的分布比例(图 6a、图 6c)。研究区的斜坡 多分布在塬边及沟道两侧,多以延伸较长的缓坡存 在,斜坡单元的坡度大多为 0~15°,坡高大多为 30~170 m。在此基础之上,统计研究区在册历史黄 土滑坡灾害在各坡度、坡高区间分布的比率(图 6b、 图 6d),可以发现即使高坡和陡坡所占的比例不大, 但其上发生滑坡的概率是最高的。







从研究区统计的斜坡单元和在册历史滑坡的地 形特征出发,结合时序 InSAR 技术反演的形变数据, 构建黄土滑坡易发指数来表示斜坡单元的不稳定程 度,用以快速搜寻定位不稳定的斜坡区域,其中斜坡 坡度与坡高对于斜坡致滑的影响程度参考陕西中部 黄土滑坡统计数据,分别赋予坡度和坡高参数的权重 为 0.65 和 0.35,易发指数 I 的公式如下:

$$I = \frac{\alpha \times 0.65 + h \times 0.35}{1 - v}$$
(1)

式中: α表示坡度区间内发生滑坡的比率, h表示 坡高区间内发生滑坡的比率, v表示地表形变速率, 因 各参数单位不同, 参数α、h和v均归一化取无量纲 数值。

以 0.2 m 精度的 DEM 为数据,利用 ArcGIS 水文 分析工具,将研究区划分为斜坡单元,参照公式(1)计 算得到了结合地表形变参数和斜坡地貌特征的区域 黄土滑坡易发指数(图 7),采用自然断点法将黄土滑 坡易发指数分为 5 个等级,能够直观、快速地锁定滑 坡隐患最有可能发生的区域。该易发指数不同于传 统易发性在于该指数强调滑坡灾害的前兆特征,传统 滑坡易发性的理论实质是一种类比的方法,即与已发 生滑坡所在区域具有相似的地质环境,其滑坡发生的 概率高于未发生滑坡区域(张林梵等,2022)。但滑坡 灾害从孕育到破坏,其滑体的重心降低、势能减小,大 幅度滑动过的斜坡稳定性普遍高于滑动之前,斜坡从 近乎失稳状态转变为相对稳定状态,斜坡滑动之后, 斜坡特征如坡度、高程、曲率、结构类型等都发生了 改变。因此,以滑动后的斜坡特征来预测原有斜坡的 滑动可能性,预测效果往往与实际差距很大。因此本 文假设形变量大的斜坡在未来极有可能演化为滑坡 这一前提,以形变明显的滑坡隐患来替代规模性滑动 之前的斜坡特征,一定程度上提高了滑坡隐患早期识 别的精度。



图 7 易发性指数等级图 Fig. 7 Vulnerability index grade chart

2.3 黄土滑坡隐患航拍影像确定和野外核查

易发指数等级划分排除了非斜坡地貌区和影像 采集时间内稳定斜坡区域,选择易发指数大于 0.231 的斜坡区域,依据三维倾斜摄影得到的高精度航拍影 像,人为圈定滑坡和滑坡隐患可能发生的斜坡区域。

在此基础之上,开展野外核查。野外核查定性标准为:黄土滑坡具有显著的滑动特征,包括坡脚滑体堆积、滑体下挫所致的滑坡后壁、后缘拉张裂缝等;滑坡隐患判据参考李萍等(2009)提出的极限状态斜坡的3条识别标志:①坡顶或坡体中上部见条带状拉张裂隙。②坡面局部存在滑塌,且较为破碎。③位于已滑斜坡的两侧,且具有相同的地形地貌特征。

按以上黄土滑坡及隐患的判据,经野外实地核查

后,从104处地表形变明显区域中,共识别黄土滑坡 及隐患23处,其中包括在册的滑坡灾害点3处,新识 别的滑坡隐患20处;23处黄土滑坡及隐患的面积范 围为0.00143~0.10914 km²,总面积为0.53 km²。对比 研究区内共有的29处在册历史滑坡,笔者从中识别 了3处滑坡分别为:马渡王村一组滑坡(HP8)对应滑 坡隐患X3、水家嘴滑坡(HP25)对应滑坡隐患X9、安 村镇腰道村滑坡(HP29)对应滑坡隐患X14,未在滑坡 编录数据中的滑坡隐患共20处(图8)。





Fig. 8 Early identification results of hidden dangers of loess landslide and spatial distribution of historical landslide points

3 分析与讨论

与传统的地灾调查相比,黄土滑坡早期识别的重 点是对尚未发生但有可能发生的滑坡灾害进行分析 和识别,为方便对比这两者的区别,将研究区历史滑 坡灾害与新识别的黄土滑坡隐患的活动性依次分类, 分为稳定、休眠、活动和复活4个类型,稳定和休眠状 态表示斜坡在过去一年内未滑动。常用的斜坡活动 性判断方法是对比斜坡当前的活动速率和该斜坡原 始的活动速率,但因研究区未统计斜坡的原始活动速 率,无法与目前的变形速率对比,因此以 InSAR 技术 反演的地表形变信息简化斜坡稳定性和活动性的评 价标准。结合研究区早期识别的结果,研究区的在册 历史滑坡和新识别的滑坡隐患按年变形量大小划分 为稳定、活动、复活/活动(针对于活动状态的历史滑 坡)(表 2)。

从研究区黄土滑坡早期识别结果与在编历史滑

表 2 新识别滑坡隐患和历史滑坡灾害活动性分类表

Tab. 2 Classification of newly identified landslide hazards and activities of historical landslide hazards

类型	划分标准	活动性	统计
历史滑坡灾害(点位信息)	年变形量<10 mm/yr	稳定	HP1~HP7、HP8~HP24、HP26~HP28(共26个)
	年变形量>10 mm/yr	复活/活动	HP8、HP25、HP29(共3个)
滑坡隐患(识别范围)	在亦形导入10 mm/vr	活动	X1~X2、X4~X8、X10~X13、X15~X23(共20处)
	中文形重>10 mm/yi	复活/活动	X3、X9、X14(共3处)

坡灾害点重合度可以看出,29处在编历史滑坡中仅 有3处存在形变,26处历史滑坡所在区域在雷达影像 采集的近两年内形变量不明显,处于稳定状态。分析 识别到的黄土滑坡隐患与在册历史滑坡重复率低的 原因包括以下3点:①收集到的历史灾害点数据年份 较早,部分在册灾害未能及时核销。②据前期地质灾 害调查资料显示,存在潜在威胁的滑坡均已工程治理, 其中 HP1~HP9安装有简易监测仪器,除马渡王村一 组滑坡(HP8)外,其余斜坡滑动后均处于稳定状态。 ③对于隐蔽性、形变不明显、滑动位置位于高陡斜坡 中上部的灾害及其隐患,通过传统地灾调查很难 发现。

传统的地灾调查以技术人员实地调查为主,调查 结果以地质灾害形态特征明显、变形特征显著、变形 特征无遮挡为主,对于形变不明显的滑坡隐患识别准 确度不高。张毅(2018)利用 InSAR 技术的地表形变 监测,对白龙江流域变形较大的区域进行空间叠置分 析和野外调查验证,成功识别出活动斜坡 133 处,其 中已知滑坡 33 处,占比不到 25%,同样说明了传统手 段调查精度低,早期识别环节薄弱,这也就导致灾难 性后果的地质灾害 70% 以上都不在已知的地质灾害 隐患点内(许强等, 2019)。

通过野外实地调查与验证,结合形变数据,将斜 坡活动状态分为稳定、活动和复活 3 类,验证结果说 明了 InSAR 技术在早期识别大范围区域地质灾害方 面结果可靠、准确,为斜坡稳定性分析和滑坡体早期 识别提供了强有力的技术手段。

ALOS-2的L波段穿透性高,可以捕捉到长时序、高精度的地表形变信息,与工程类比、野外调查相结合,可以弥补传统灾害调查在早期识别环节的局限性, 有效提高区域范围内黄土滑坡早期识别的时效性和 可靠性,加强对尚未发生的地质灾害进行分析和识别, 为地质灾害风险防控提供决策性指导。

4 结论

(1)应用时序 InSAR 技术、DEM 地形特征、航拍 影像判识和野外核查的方法在西安市白鹿塬西南区 成功识别出 23 处黄土滑坡及其隐患,其中包括在册 滑坡灾害点 3 处,新识别的滑坡隐患 20 处。

(2)与在册灾害点对比发现,时序 InSAR 结合 DEM 地形数据识别的黄土滑坡隐患能更好捕捉黄土 斜坡灾变的前兆信息,尤其在常规调查难以发现的形 变不明显、隐蔽性滑坡隐患区域,具有较好的早期识 别效果。

(3)在时序 InSAR 反演的地表形变数据基础上, 结合 DEM 地形分析的黄土滑坡易发指数,可快速锁 定具有形变的斜坡区域,通过航拍影像与野外核查, 确保了滑坡隐患识别的真实性。

(4)区域形变数据涵盖地表所有的形变特征,构 建包含形变信息和地形特征的黄土滑坡易发指数,将 形变信息与斜坡地质概况相结合,能够避免仅依靠数 据判断的失真性。

致谢:感谢西安交通大学张茂省教授提供的白 鹿塬调查区基础数据和 ALOS-2 数据及对文章提供的 建设性意见;感谢兰州大学张毅老师和西安地调中 心冯旻譞在雷达影像数据处理方面提供的帮助。

参考文献(References):

- 陈思名. 基于 InSAR 技术的潜在滑坡早期识别方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- CHEN Siming. Research on Early Identification Method of Potential Landslides Based on InSAR Technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- 廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LIAO Mingsheng, WANG Teng. Time Series InSAR Technology

and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2014.

- 惠明强.基于数值模拟的地下水位上升条件下区域性斜坡稳定 性研究-以西安白鹿塬为例[D].西安:长安大学,2020.
- HUI Mingqiang. Study on the stability of regional slope under the condition of rising groundwater level based on numerical simulation: a case study of Bailuyuan in Xi'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- 李宝田,刘文红.白鹿塬黄土滑坡发育类型及成因机制研究[J]. 中外公路,2021,41(S2):39-43.
- LI Baotian, LIU Wenhong. Research on the Development Types and Genetic Mechanisms of Loess Landslides in Bailuyuan[J]. Sino Foreign Highway, 2021, 41(S2): 39–43.
- 李萍, 王秉纲, 李同录. 自然类比法在黄土路堑边坡设计中的应 用研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(02): 1-5.
- LI Ping, WANG Binggang, LI Tonglu. Research on the Application of Natural Analogy in the Design of Loess Cutting Slopes[J]. Highway Transportation Technology, 2009, 26(02): 1–5.
- 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(05):714-730.
- PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. The dynamic mechanism of landslide disasters in the Loess Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(05): 714–730.
- 孙萍萍,张茂省,贾俊,等.中国西部黄土区地质灾害调查研究 进展[J].西北地质,2022,55(03):96-107.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. Progress in Geological Hazard Investigation and Research in Loess Regions of Western China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(03): 96–107.
- 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(07): 957–966.
- XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Early identification, monitoring and warning of major geological hazard hazards based on the integration of space and earth[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2019, 44(07); 957–966.

- 张毅. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- ZHANG Yi. Research on Surface Deformation monitoring and Early Landslide Identification Based on InSAR Technology[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- 张路,廖明生,董杰,等.基于时间序列 InSAR 分析的西部山区 滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J].武汉大 学学报(信息科学版),2018,43(12):2039–2049.
- ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early identification of landslide hazards in western mountainous areas based on time series InSAR analysis: A case study of Danba, Sichuan[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2018, 43(12): 2039–2049.
- ZHOU Chao. Research on Early Identification and Prediction of Landslides by Integrating Time Series InSAR Technology[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- 张林梵, 王佳运, 张茂省, 等. 基于 BP 神经网络的区域滑坡易发 性评价[J]. 西北地质, 2022, 55(02): 260-270.
- ZHANG Linfan, WANG Jiayun, ZHANG Maosheng, et al. Evaluation of regional landslide susceptibility based on BP neural network[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(02): 260–270.
- Agliardi F, Crosta G B, Frattini P, et al. Giant non-catastrophic landslides and the long-term exhumation of the European Alps[J]. Earth & Planetary Sciences Letters, 2013, 365: 263–74.
- Lin X Y, Zhang L F, Yang Z, et al. Inversion analysis of the shear strength parameters for a high loess slope in the limit state[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(01): 252–264.
- Zhang Z L, Zeng Q M, Jiao J. Deformations monitoring in complicated-surface areas by adaptive distributed Scatterer InSAR combined with land cover: Taking the Jiaju landslide in Danba, China as an example[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 186.