

## D-InSAR与随机森林模型耦合的活动性滑坡识别方法探究

高星月, 王世杰, 高鹏程

### Active landslide identification with a combined method of D-InSAR and random forest model

GAO Xingyue, WANG Shijie, and GAO Pengcheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203029>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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

#### 基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

#### 甘肃舟曲埡豁口滑坡复活机理及成因探讨

Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes (Zhouqu County, Gansu, China)

窦晓东, 张泽林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 9-18

#### 联合升降轨InSAR与高分辨率光学遥感的滑坡隐患早期识别

Early identification of hidden dangers of landslides based on the combination of ascending and descending orbits InSAR and high spatial resolution optical remote sensing: A case study of landslides in Longde County, southern Ningxia

涂宽, 王文龙, 谌华, 李樵民, 耿丹, 王川, 郑健, 杨影 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 72-81

#### 基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

#### 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59



DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203029

高星月, 王世杰, 高鹏程. D-InSAR 与随机森林模型耦合的活动性滑坡识别方法探究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 102-108.

GAO Xingyue, WANG Shijie, GAO Pengcheng. Active landslide identification with a combined method of D-InSAR and random forest model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 102-108.

# D-InSAR 与随机森林模型耦合的活动性滑坡识别方法探究

高星月<sup>1,2,3</sup>, 王世杰<sup>1,2,3,4</sup>, 高鹏程<sup>1,2,3</sup>

1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州, 730070;
2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州, 730070;
3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070;
4. 甘肃大禹九州空间信息科技有限公司院士专家工作站, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 灾害的早期识别是防灾减灾领域的关键技术。文中以甘肃省舟曲县为例, 利用 2018 年 1 月—2019 年 1 月 Sentinel-1A 雷达卫星降轨数据和 2021 年 5 月 Sentinel-2 光学遥感影像数据, 通过 D-InSAR 技术获取研究区地表形变信息, 利用随机森林模型识别潜在的滑坡体。结果表明: 使用已有的滑坡数据集, 采用随机森林模型能够较好地识别出潜在滑坡体。潜在滑坡点分布位置均位于地表形变量大的区域。舟曲县整体形变沿东西向发生, 主要分布于舟曲县东北和西南方向, 与潜在滑坡点高度重合。识别出的潜在滑坡点(立节乡北山滑坡), 年形变量达到 0.12 m, 于 2021 年 1 月 18 日发生滑坡, 该滑坡典型案例也印证了文中方法的有效性。

**关键词:** 滑坡; 灾害识别; InSAR; 随机森林模型; 舟曲县

**中图分类号:** P642.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-8035(2022)05-0102-07

## Active landslide identification with a combined method of D-InSAR and random forest model

GAO Xingyue<sup>1,2,3</sup>, WANG Shijie<sup>1,2,3,4</sup>, GAO Pengcheng<sup>1,2,3</sup>

1. School of Surveying, Mapping and Geographic Information, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center of Geographic National Conditions Monitoring Technology Application, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Engineering Laboratory of Geographic and National Conditions Monitoring of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China;
4. Academician Expert Workstation of Gansu Dayu Jiuzhou Space Information Technology Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** Early identification of disaster is a key technical problem in disaster prevention and mitigation. In this study, Zhouqu County, Gansu Province was taken as an example. Based on Sentinel-1A radar satellite orbit landing data from January 2018 to January 2019 and Sentinel-2 optical remote sensing image data from May 2021, D-InSAR technology was used to obtain

**收稿日期:** 2022-03-21; **修订日期:** 2022-05-30      **投稿网址:** <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41861061); 兰州交通大学天佑创新团队(TY202001)

**第一作者:** 高星月(1998-), 女, 河南郑州人, 测绘科学与技术专业, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 与机器学习方法结合进行滑坡早期识别方面的研究。E-mail: 2890756001@qq.com

**通讯作者:** 王世杰(1971-), 男, 甘肃民勤人, 正高级工程师, 主要从事灾害监测及自然资源变化监测方面的研究。

E-mail: wangshijie@mail.lzjtu.cn

surface deformation information in the study area, and Random Forest model was used to identify potential landslides. The results show that using the existing landslide data set, the random forest model can identify the potential landslide well. The distribution locations of potential landslide are all located in areas with large surface shape variables. The overall deformation occurred along the east-west direction, mainly distributed in the northeast and southwest directions of Zhouqu County, and overlapped with the potential landslide. The identified potential landslide point (Beishan landslide in Lijie Township) has an annual variable of 0.12 m, and the landslide occurred on January 18, 2021. This typical landslide case also confirms the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** landslide; disaster identification; InSAR; random forest; Zhouqu

## 0 引言

滑坡是岩石碎屑或大型边坡移动的自然现象,在山地演变进程中发挥了重要的作用,其诱发因素通常包括强降雨、径流、地震或者火山爆发等<sup>[1]</sup>。近年来,甘肃省舟曲县滑坡地质灾害频发<sup>[2]</sup>,给经济发展和社会稳定造成了严重影响。由于滑坡孕灾环境及各类诱发因素的复杂性,早期识别与预测难度较大,对滑坡灾害的预防缺乏依据<sup>[3]</sup>。

实地调查发现潜在滑坡区域并更新滑坡库存是常见和可靠的方法,传统方法使用全站仪、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等进行实地调查,可以得到滑坡数据集,包括精确的边界、空间位置和分布,但由于地形的复杂和不稳定性,这些技术费时费力且成本高昂,一般只能针对已知的滑坡体进行监测,无法实现大范围探测<sup>[4-7]</sup>。遥感影像具有获取周期短,覆盖面积大及获取快速方便等特点,因此 SAR 影像和光学遥感影像在滑坡识别中得到广泛应用。除此之外,随着人工智能和大数据的蓬勃发展,机器学习算法在区域滑坡隐患识别中也得到了越来越多的应用。代聪等<sup>[2]</sup>利用 2017 年 10 月—2018 年 12 月 Sentinel-1A 雷达卫星升降轨数据,基于短基线干涉测量方法(Small Baseline Subset, SBAS)得到了舟曲县城上下游区域活动滑坡的地表形变; Shirvani 等<sup>[8]</sup>采用 Sentinel-1A 和 Sentinel-2 数据协同分析的方法和面向对象的随机森林模型绘制历史滑坡数据,利用光学和 SAR 振幅图像进行滑坡隐患识别,利用 Sentinel-1A SAR 数据和 Sentinel-2 光学图像在印度东北部植被和丘陵地区识别新的滑坡; Piralilou 等<sup>[9]</sup>使用多尺度的图像分割和不同的机器学习模型进行了喜马拉雅山脉滑坡监测; 涂宽等<sup>[10]</sup>结合 D-InSAR 技术和高分辨率光学遥感影像,基于专家判识经验对滑坡隐患进行识别探测。目前已有的研究主要集中在采用单一方法如 InSAR 技术或机器学习模型方法进行活动性滑坡识别。

文中选定甘肃舟曲县为研究区域,结合 Sentinel-1A 卫星 SAR 影像数据,利用 D-InSAR 技术和已知的滑坡数据集,运用随机森林算法(Random Forests, RF)进行模型训练,对研究区滑坡隐患进行识别,并利用叠置分析方法对地表形变与滑坡隐患识别结果进行耦合分析。

## 1 研究区概况

舟曲县地处甘肃甘南藏族自治州,东邻陇南市,北接宕昌县,西南与四川省九寨沟县接壤。地处秦岭山脉,岷山山系贯穿全境,是典型的高山峡谷地貌。该区域位于白龙江流域,自然灾害频发<sup>[11-12]</sup>,是“5·12”特大地震和“8·8”泥石流灾害中受灾严重的区域<sup>[13]</sup>。

近年来人类活动愈发频繁,舟曲县生态环境不断恶化,斜坡的岩土结构失稳,滑坡灾害频发。2017 年灾害统计发现,研究区内自西向东产生了锁儿头、门头坪及江顶崖等<sup>[14]</sup>34 处滑坡及隐患点,其中多数属于大型深层滑坡。2018 年 7 月 12 日南峪乡江顶崖滑坡发生大规模失稳,堵塞白龙江形成堰塞湖,严重威胁人民生命财产安全,滑坡稳定性问题再次引起社会广泛关注<sup>[15]</sup>。研究区地理位置及地形地貌见图 1。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究数据及预处理

#### (1) Sentinel-1A 数据

分别从阿拉斯加卫星通讯社(<https://search.asf.ala.ska.edu/>)和欧空局哥白尼数据中心网站(<https://scihub.copernicus.eu/>)收集了研究区 Sentinel-1A 降轨数据和 Sentinel-2 光学遥感影像数据,进行了基线估算、辐射定标和大气校正等预处理(表 1)。

#### (2) 滑坡数据集

选用武汉大学滑坡检测数据集,该滑坡数据集来自于全色波段 0.8 m,多光谱波段为 3.2 m 的 TripleSat 卫星数据,通过卷积神经网络基于注意力机制从 Triple-

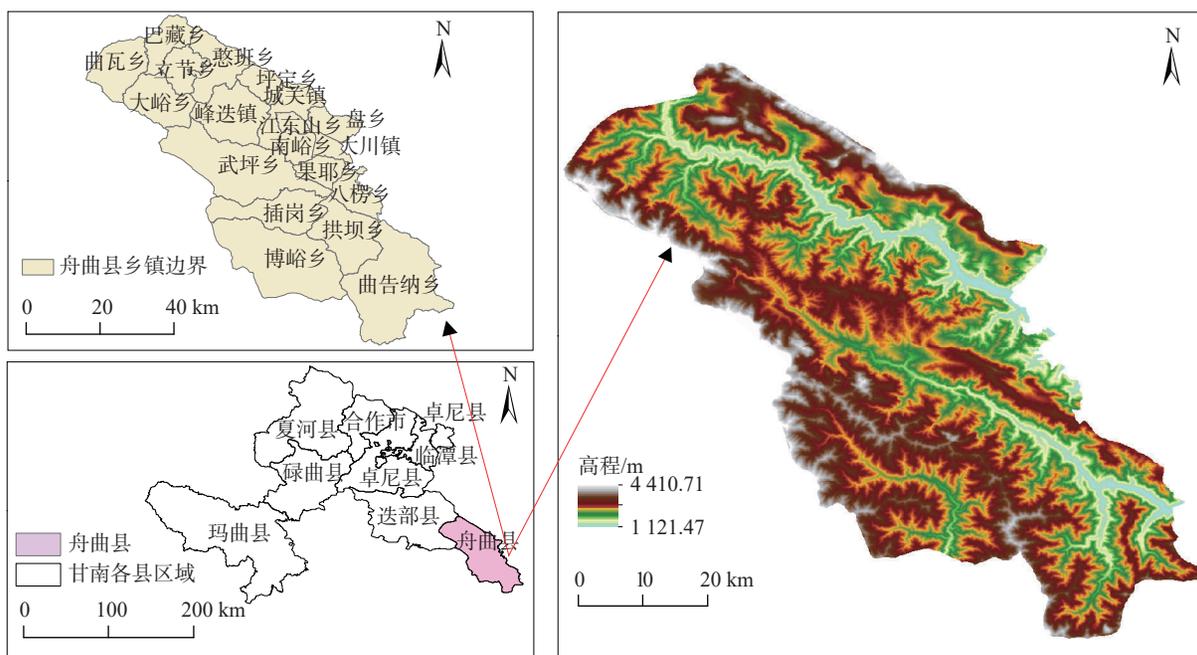


图 1 研究区行政区划及地形图

Fig. 1 Topographic map and administrative division of the study area

表 1 卫星数据参数

Table 1 Satellite data parameters

卫星数据源	轨道方向	波段	中心入射角/(°)	分辨率/m	日期
Sentinel-1A	降轨	C	29~36	5×20	2018-01-21
Sentinel-1A	降轨	C	29~36	5×20	2019-01-04
Sentinel-2		红、绿、蓝		10	2021-05-09

Sat 卫星图像和数字高程模型数据集来检测滑坡<sup>[16]</sup>, 主要使用卫星数据中划分开的滑坡数据和非滑坡数据 2 个部分(表 2)。

表 2 滑坡数据集<sup>[16]</sup>

Table 2 Landslide data set<sup>[16]</sup>

文件类型	滑坡数据/张	非滑坡数据/张
滑坡图像(*.png)	770	2 003
滑坡形状文件(掩膜文件*.png)	770	
DEM数据(*.png)	770	2 003
边界坐标(多边形*.txt)	770	

使用滑坡发生前两景 Sentinel-1A 降轨数据, 结合 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据(空间分辨率为 90 m), 辅助去除地形相位, 提取研究区地表形变信息。选取一幅滑坡发生后的 Sentinel-2 光学遥感影像数据, 运用 Sen2cor 软件, 结合随机森林模型识别潜在的滑坡体。

## 2.2 研究方法

通过对 Sentinel-1A 滑坡发生前的 2 景影像进行基

线估算, 确定其小于临界基线, 根据同极化方式的文件生成干涉图, 进行滤波和相干性计算, 采用最小费用法相位解缠, 输入控制点文件, 进行轨道精炼和相位偏移计算, 消除可能出现的斜坡相位和纠正相位偏移, 最后结合合成相位转换为形变数据。Sentinel-1A IW 宽幅干涉 SAR 数据具有超高的地面覆盖范围, 可利用差分干涉测量技术获取大范围的地表形变信息, 为后期基于遥感影像的活动性滑坡信息准确识别缩小搜寻范围, 提升滑坡隐患识别效率。

采用随机森林模型, 基于决策树方法, 训练过程中通过重采样得到样本数据, 构造大量决策树, 综合预测结果, 利用均值或者投票方式得到最终预测结果<sup>[17]</sup>。决策树的训练样本以及节点选取采用随机机制, 以降低对过拟合问题<sup>[18]</sup>的敏感性。基于每个决策树产生输出, 然后根据输出确定权重。建树过程中, 每个属性都要遍历所有可能的分割方法, 选择具有最小 Gini 系数的属性为分裂属性。Gini 系数越小, 代表所产生的样本子集中, 样本类别内容越单纯。技术路线如图 2 所示。

## 3 试验结果与分析

运用 D-InSAR 方法提取甘肃舟曲的地表形变信息, 利用随机森林模型对该区域的滑坡隐患点进行识别, 通过重采样对比分析地表形变与滑坡隐患识别之间的关系。

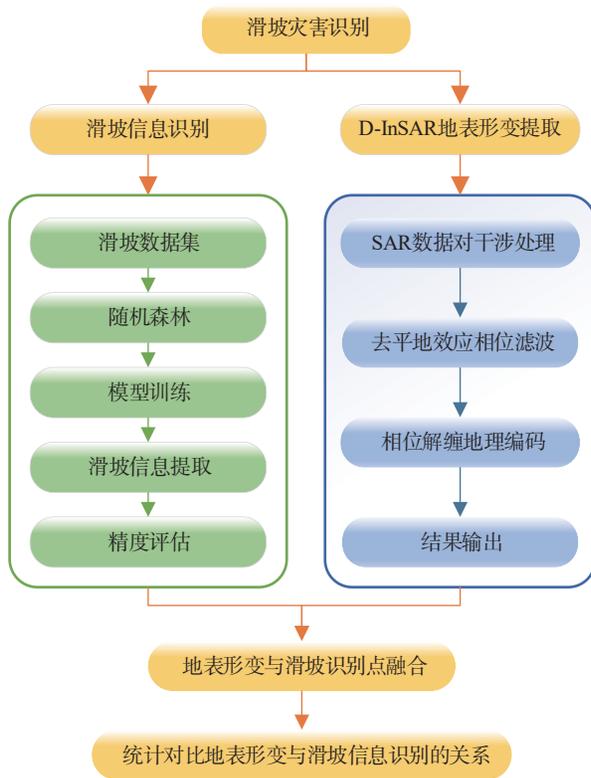


图 2 滑坡识别技术路线图

Fig. 2 Technology road map of landslide identification

### 3.1 地表形变分析

Sentinel-1A 卫星降轨影像, 经过 D-InSAR 差分干涉处理得到舟曲县 1 年间的的海表形变信息(图 3)。红色区域(正值)表示目标沿着 LOS 方向向卫星方向上移动, 蓝色区域(负值)表示目标沿着 LOS 方向向卫星反方向移动, 绿色区域表示相对稳定。由图 3 可知, 舟曲县的地表形变存在明显的区域分异特征, 舟曲县北部形变具有分散分布特征, 形变信息大的区域位于立节乡, 最大沉降量为 0.12 m, 形变量集中在 0.03 ~ 0.04 m。舟曲县南部形变量分布在 0.02 ~ 0.10 m, 最大形变量为 0.20 m, 集中分布在舟曲县西南方向的博峪乡和插岗乡, 具有密集分布特征。舟曲县境内滑坡运动方向总体以东西向滑动为主, 与贯穿舟曲县境内的秦岭山脉走向一致。

### 3.2 滑坡识别

利用随机森林模型, 基于已知滑坡数据集对 Sentinel-2 预处理后的数据进行滑坡隐患识别。构建网格参数, 采用网格搜索得到合适的参数进行模型训练。随机数种子确定为 10 以确保每次运行可以得到相同的结果, 决策树分裂节点的标准采用基尼系数法, 数量取 100, 保证训练精度与运算速度相协调。融合地表形变信息, 选择精度吻合最佳结果进行分析预测, 结果如

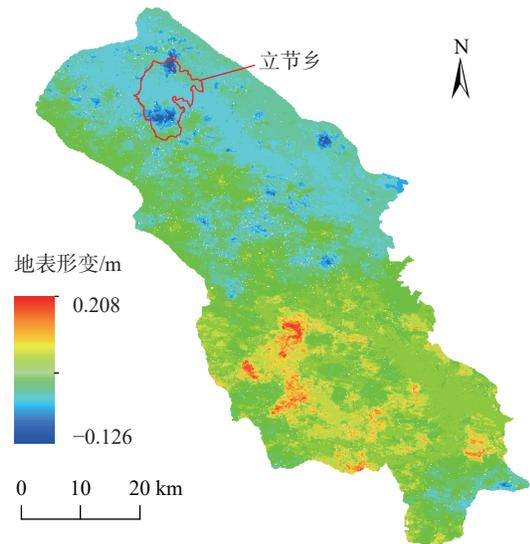


图 3 舟曲地表形变信息图

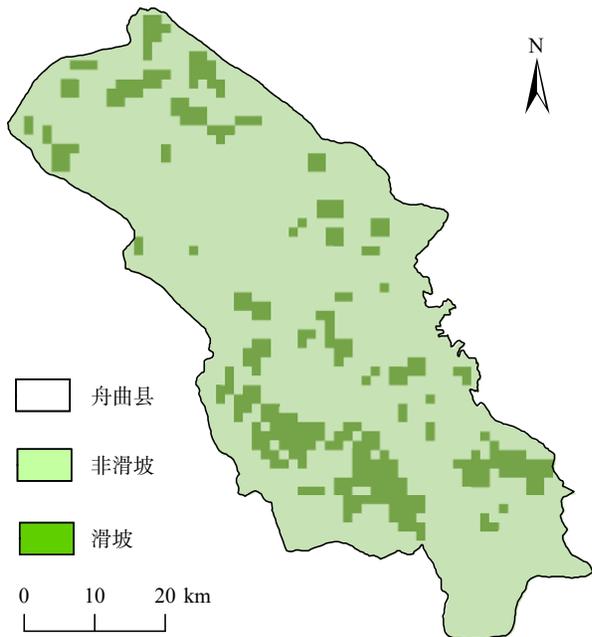
Fig. 3 Surface deformation information map of Zhouqu

图 4(a)所示。训练测试过程中, 运用 75% 的样本图像作为训练数据, 25% 的样本图像进行测试, 滑坡识别测试精度、召回率、准确率分别为 0.85, 0.75, 0.70, 综合得到 ROC 曲线和曲线下面积值, 如图 4(b)所示。识别结果分析可知, 舟曲潜在在滑坡体主要分布在东北方向与西南方向上, 与图 3 提取出的地表形变量较大区域具有高度重合性, 地表形变信息可以较好地辅助判断滑坡隐患识别点。实验过程中, 研究区边界会误判定为滑坡, 为了提高识别精度, 将边界部分去除后预测。滑坡隐患识别中, 识别精度很大程度上会受到切片影响, 图像不同分割方法会产生不同的实验结果。通过调参确定, 切片精度为 255 时, 识别准确性最高。

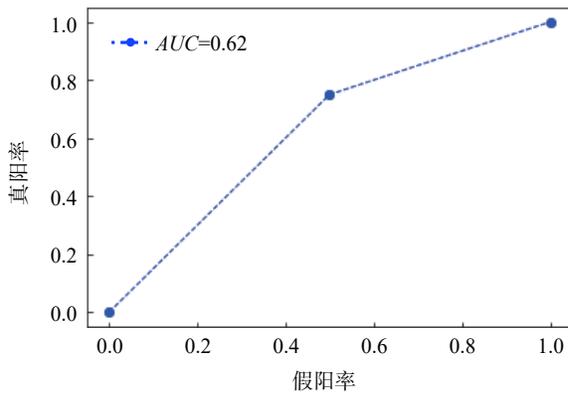
### 3.3 地表形变与滑坡识别叠置分析

由于地表形变信息与滑坡隐患高度相关, 将滑坡识别结果转化为区域点, 与地表形变信息叠加, 结果如图 5 所示。针对地表形变信息与滑坡隐患识别的关联性, 选取滑坡隐患识别点分布集中且形变量大的舟曲县东北和西南方向进行融合。

图 5 分析可以看出, 形变量较大的东北方向上, 滑坡隐患识别点主要分布在立节乡和城关镇区域, 其中地表沉降量大于 0.06 m 的区域大都被识别为潜在滑坡体; 西南方向上, 滑坡识别点集中在博峪乡范围内, 分布区域的地表形变量多数大于 0.14 m。对于形变信息较大的区域, 果耶乡等都被识别为滑坡区域, 证实了地表形变与滑坡识别结果的一致性。在将识别的滑坡隐患区域转化为滑坡点的过程中存在一定的误差, 所以对于滑坡点的筛选应结合地表沉降信息进行分析。



(a) 随机森林模型滑坡识别区域



(b) ROC曲线

图 4 舟曲县随机森林模型滑坡识别区域和 ROC 曲线

Fig. 4 Landslide identification area of Random Forest model and ROC curve in Zhouqu

为了验证地表形变与潜在滑坡体之间的强相关性,以舟曲县沉降量明显的立节乡为例进行叠置分析,结果见图 6。立节乡北坡存在较大地表形变,最大沉降量为 0.12 m,该区域也相应的识别出了滑坡隐患点,证实了地表形变信息与滑坡隐患的识别结果具有高度一致性。通过对立节乡遥感影像的局部区域进行目视解译,见图 7(a),可见滑坡沿东西向产生滑动,与该区域的地表形变信息进行叠加分析,见图 7(b),滑坡与地表形变区域具有高度重合性且滑坡方向一致。据中国自然资源报报道,2021 年 1 月,立节乡北山滑坡发生了滑动,证明了地表形变信息辅助滑坡识别的科学性。从图 5 可以看出,立节乡南部存在地表沉降区域,相应地识别出了滑坡隐患点,应作为重点监测区域。识别与形

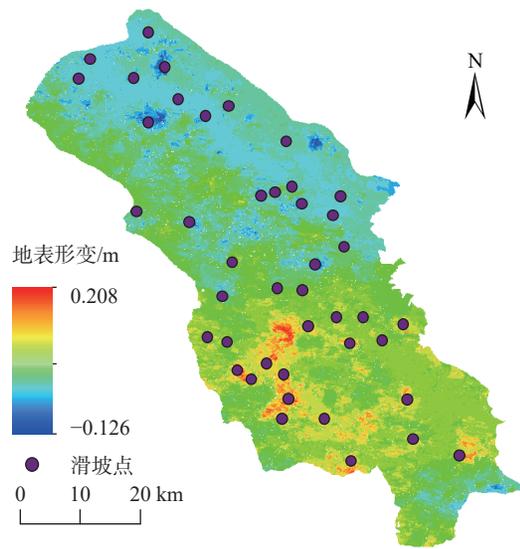


图 5 舟曲地表形变与滑坡识别点叠合图

Fig. 5 Overlap diagram of Zhouqu surface deformation and landslide identification points

变出现重合时应提前预防,对该区域实施不间断地监测评估,根据评估结果针对不同灾害等级采取应对措施,及时撤离相关区域人员,保证人民生命与财产安全。

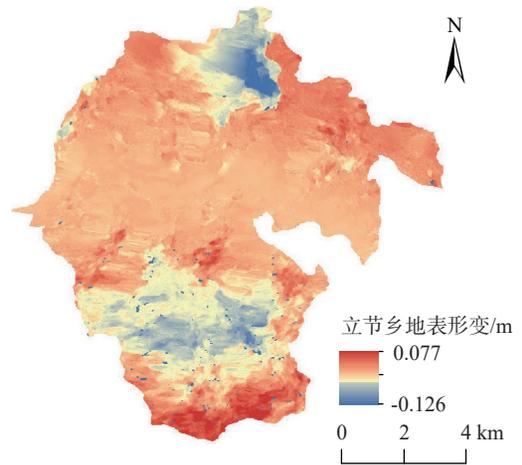


图 6 立节乡地表形变信息图

Fig. 6 Information map of surface deformation in Lijie Township

#### 4 结论

利用 Sentinel-1A 降轨影像和 Sentinel-2 光学遥感影像,通过 D-InSAR 技术对舟曲县地表形变信息进行探测,结合随机森林模型对研究区滑坡隐患进行识别,并针对典型滑坡区域(立节乡)进行实证研究,主要结论如下:

(1)舟曲县的整体形变绝对量在 0.08 m 以内,存在明显的形变区域分异,整体滑坡运动方向为东西向,与

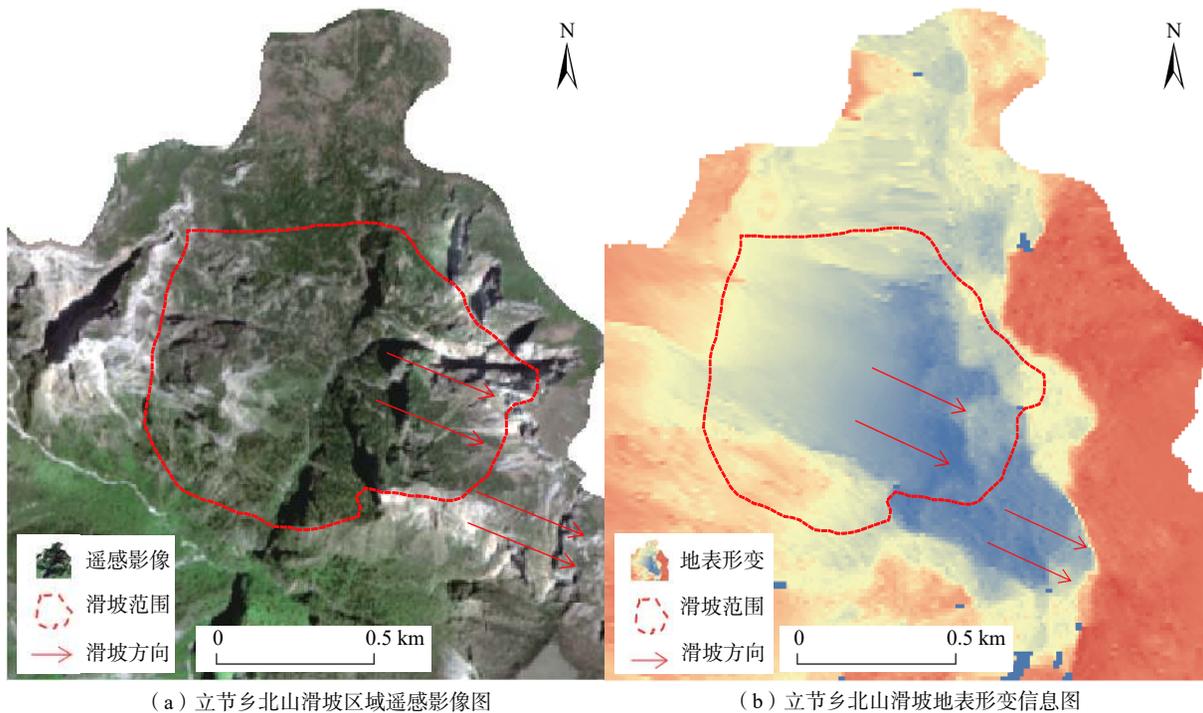


图 7 立节乡局部滑坡区域遥感影像图和地表形变信息对比图

Fig. 7 Comparison map of remote sensing image and surface deformation information of local landslide in Lijie Township

贯穿舟曲县境内的秦岭山脉走向一致。

(2) 滑坡隐患识别结果与地表形变数据基本吻合,说明地表形变信息对于潜在滑坡体的识别具有强参考性,进而证实了结合地表形变信息运用已有滑坡数据集进行区域滑坡识别学习的可行性。

(3) 立节乡研究时段内形变量达到 0.18 m, 是舟曲县域地表沉降最大的区域,也识别出了潜在滑坡体,同时该区域于 2021 年 1 月 18 日发生北山滑坡,证实了 D-InSAR 与随机森林模型耦合的活动性滑坡识别方法具有一定的可靠性。

(4) 通过地表形变信息和随机森林识别结果相结合的方法进行潜在滑坡体的识别,两者可以在相辅相成的情况下提高识别精度,最大限度地识别出滑坡灾害隐患,对提高滑坡隐患识别的精度具有可靠性和一定的广泛适用性。

(5) 由于文中主要目的是探测研究区域活动滑坡,因此仅选取了时间间隔为 1 年的 2 期 Sentinel-1A 雷达影像数据,不能充分揭示研究区滑坡隐患点的形变规律,该问题可作为后续研究的重点。

#### 参考文献(References):

[1] 李为乐,许强,陆会燕,等.大型岩质滑坡形变历史回溯及其启示[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44

(7): 1043-1053. [LI Weile, XU Qiang, LU Huiyan, et al. Tracking the deformation history of large-scale rocky landslides and its enlightenment [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 1043-1053. (in Chinese with English abstract)]

[2] 代聪,李为乐,陆会燕,等.甘肃省舟曲县城周边活动滑坡 InSAR 探测[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(7): 994-1002. [DAI Cong, LI Weile, LU Huiyan, et al. Active landslides detection in Zhouqu County, Gansu Province using InSAR technology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 994-1002. (in Chinese with English abstract)]

[3] 林荣福,刘纪平,徐胜华,等.随机森林赋权信息量的滑坡易发性评价方法[J].测绘科学,2020,45(12): 131-138. [LIN Rongfu, LIU Jiping, XU Shenghua, et al. Evaluation method of landslide susceptibility based on random forest weighted information [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(12): 131-138. (in Chinese with English abstract)]

[4] 赵延岭.基于 InSAR 技术的树坪滑坡识别与研究[D].西安:长安大学,2017. [ZHAO Yanling. Identification and research of Shuping landslide based on InSAR technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese with English abstract)]

[5] 赵超英,刘晓杰,张勤,等.甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7): 996-1007. [ZHAO Chaoying, LIU

- Xiaojie, ZHANG Qin, et al. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 996 – 1007. (in Chinese with English abstract)
- [ 6 ] DONG J, LIAO M S, XU Q, et al. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin [J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95 – 109.
- [ 7 ] 张拴宏, 纪占胜. 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)在地面形变监测中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, 15(1): 112 – 117. [ ZHANG Shuanhong, JI Zhansheng. A review on the application of interferometric synthetic aperture radar on surface deformation monitoring [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(1): 112 – 117. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] SHIRVANI Z, ABDI O, BUCHROITHNER M. A synergetic analysis of Sentinel-1 and -2 for mapping historical landslides using object-oriented random forest in the Hyrcanian forests [J]. *Remote Sens*, 2019, 11(19): 2300.
- [ 9 ] PIRALILOU S T, SHAHABI H, JARIHANI B, et al. Landslide detection using multi-scale image segmentation and different machine learning models in the Higher Himalayas [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21): 2575.
- [ 10 ] 涂宽, 王文龙, 谌华, 等. 联合升降轨 InSAR 与高分辨率光学遥感的滑坡隐患早期识别——以宁夏隆德为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 72 – 81. [ TU Kuan, WANG Wenlong, CHEN Hua, et al. Early identification of hidden dangers of lanslides based on the combination of ascending and descending orbits InSAR and high spatial resolution optical remote sensing: A case study of landslides in Longde County, southern Ningxia [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 72 – 81. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 王高峰, 叶振南, 李刚, 等. 白龙江流域舟曲县城区地质灾害危险性评价 [J]. *灾害学*, 2019, 34(3): 128 – 133. [ WANG Gaofeng, YE Zhennan, LI Gang, et al. Geological hazard risk assessment of Zhouqu County in Bailong River basin [J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(3): 128 – 133. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] SUN Q, ZHANG L, DING X L, et al. Slope deformation prior to Zhouqu, China landslide from InSAR time series analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 45 – 57.
- [ 13 ] 张之贤, 张强, 陶际春, 等. 2010年“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害形成的气候特征及地质地理环境分析 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 898 – 905. [ ZHANG Zhixian, ZHANG Qiang, TAO Jichun, et al. Climatic and geological environmental characteristics of the exceptional debris flow outburst in Zhouqu, Gansu Province, on 8 August, 2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 898 – 905. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 韩旭东, 付杰, 李严严, 等. 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 180 – 186. [ HAN Xudong, FU Jie, LI Yanyan, et al. A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu County [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 180 – 186. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(12): 1778 – 1786. [ DAI Keren, ZHUO Guanchen, XU Qiang, et al. Tracing the pre-failure two-dimensional surface displacements of Nanyu landslide, Gansu Province with radar interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1778 – 1786. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] JI S, YU D W, SHEN C Y, et al. Landslide detection from an open satellite imagery and digital elevation model dataset using attention boosted convolutional neural networks [J]. *Landslides*, 2020, 17(6): 1337 – 1352.
- [ 17 ] 郝国栋. 基于随机森林模型的商南县滑坡易发性评价 [D]. 西安: 西安科技大学, 2019. [ HAO Guodong. Landslide susceptibility assessment based on random forest model in Shangnan County [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] GHORBANZADEH O, BLASCHKE T, GHOLAMNIA K, et al. Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection [J]. *Remote Sens*, 2019, 11(2): 196.