

doi: 10.6046/zrzyyg.2021413

引用格式: 潘建平,付占宝,邓福江,等. 时序 InSAR 解析消落带区域岸坡地表形变及其水要素影响[J]. 自然资源遥感,2023, 35(2):212–219. (Pan J P, Fu Z B, Deng F J, et al. A time-series InSAR-based analysis of surface deformation of hydro-fluctuation belts and the effects of hydrological elements[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2):212–219.)

时序 InSAR 解析消落带区域岸坡 地表形变及其水要素影响

潘建平, 付占宝, 邓福江, 蔡卓言, 赵瑞淇, 崔伟
(重庆交通大学智慧城市学院, 重庆 400074)

摘要: 消落带区域多发生地质灾害,因此理清库水位、降雨等因素在消落带区域地表形变中的作用对于地质灾害预警及防治具有重要意义。为此,采用短基线集差分干涉测量技术对三峡库区奉节段 2018 年 7 月—2020 年 7 月的 63 景 Sentinel-1A 升轨影像进行地表形变反演,结合地面监测点进行对比界定,通过形变量-库水位-月降雨量的时间序列图进行水要素分析。获得结论如下:①库水位变化和降雨是造成地表形变的重要因素,库水位变化对坡体影响主要体现在浮托减重效应和坡体内外的水位差,而降雨会减弱坡体的抗剪强度同时增加坡体自重进一步增加形变;②库水位变化快则地表形变大,库水位变化慢则地表形变小;③降雨与地表形变成正比,极强降雨时降雨完全主导着地表形变;④研究区地表总体稳定,但消落带邻近区域发现 2 个形变异常区域:异常区域年形变速率超过 30 mm/a,区域内最高形变速率可达 89 mm/a。结论具有较强的理论和实用价值,可为消落带区域地质灾害精准防治提供科学支撑。

关键词: 消落带; 水要素; 形变机理; SBAS-InSAR; 三峡库区奉节段

中图法分类号: P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)02-0212-08

0 引言

消落带指水库水位调节或自然水系涨落的最髙水位线与最低水位线之间形成的特殊区域^[1],区域内往往地形陡峭、沟壑纵横,地质灾害多发,尤其是滑坡灾害。水是引发地质灾害的重要因素,三峡库区深受水文地质条件影响^[2-3],因此文章对研究区地表形变进行水要素(主要是指库水位变化和降雨)分析。目前,针对消落带区域的研究主要集中在土壤、植被、生态环境状况及修复等方面^[4],对于消落带区域库水位涨落如何影响地表,带来较大量级形变,甚至引发地质灾害涉及较少。高磊^[5]以巫山为研究对象,采用遥感影像综合地质背景,选取新发地质灾害的描述指标,完成地形变化强度评价;王丰^[6]针对三峡库区奉节段已记录的滑坡灾害以统计分析方法进行岸坡稳定性评价;周剑等^[7]模拟库水位变化,研究其对木鱼

包滑坡体稳定性的影响;黄波林等^[2]阐述了消落带库水位周期性变化对岩体的劣化作用,并根据区域内统计结果作出岩体劣化能进一步加深地质灾害的合理推测;付小林等^[8]模拟不同速率的库水消落方式,导致岸坡稳定性发生不同程度的变化,进而分析两者响应规律。以上针对消落带区域的地表分析,以遥感影像和地质资料叠加统计分析或者模拟短期库水位变化来测试岸坡稳定性,未能利用长时序观测数据来量化消落带地表形变程度,也未能定量分析水要素对消落带区域地质灾害的影响及规律。

当下发展起来的合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)可为消落带区域地表分析提供长时间序列数据。早在 1989 年,Andrew 等^[9]验证 InSAR 技术可以获取大范围地表形变信息,而后发展起来的短基线干涉测量(small baseline subset interferometric synthetic aperture Radar, SBAS-InSAR)技术保持时空连

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目“智能手机辅助的多测站地面激光扫描森林调查方法研究”(编号: 41801394)、重庆市规划和自然资源局科技项目“面向城镇新增建设用地的遥感智能变化发现研究与应用”(编号: KJ-2020042)和中铁隧道集团 2021 年度科技项目“既有运营地铁站快速改造监测与控制技术研究”共同资助。

第一作者: 潘建平(1976-),男,博士,教授,主要从事摄影测量与遥感、地质工程方面的研究。Email: 6370554@qq.com。

通信作者: 付占宝(1997-),男,硕士研究生,主要从事摄影测量与遥感方面研究。Email: f2695443173@163.com。

续性和相干性^[10]的同时,还能保证影像数据的利用率,提高结果精度^[11]。结合消落带区域的时序变化与 InSAR 技术现状的综合考虑,文章采用 SBAS-InSAR 技术对三峡库区奉节段 2018 年 7 月—2020 年 7 月的 63 景升轨 Sentinel-1A 影像进行地表形变反演,得到反演结果,进而分析其形变特征及水要素影响。

1 研究区概况

研究区地理位置位于重庆市奉节县境内,N30°29′19″~31°22′33″,E109°1′17″~109°45′58″(地理位置如图 1 所示)。奉节县地处四川盆地,东部和北部为典型的山地,地势较高,中部和西部地势较为缓和^[12]。奉节县境内出露均为沉积岩层,无岩浆岩、变质岩,从志留系至第四系均有分布^[13]。区域内沉积岩、无岩浆岩、变质岩分布,构造运动主要表现为明显的升降运动^[3]。奉节县属中亚热带湿润季风气候,夏季炎热,冬季温暖,降雨主要集中在 5—10 月,日照条件良好^[14]。区域内高程介于 69~1 403 m 之间。

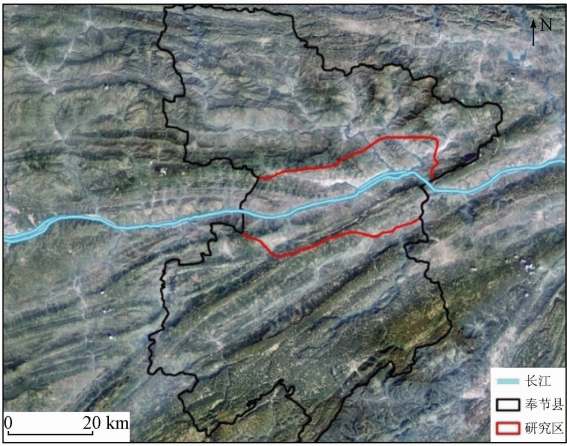


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location map of the study area

2 实验数据

综合观测精度与观测周期,选取 2018 年 7 月—2020 年 7 月共 63 景 Sentine-1A 卫星升轨影像,卫星影像参数如表 1 所示。此外,在数据处理过程中,还需要引入外部数据来去除因卫星轨道、微波传输过程、地形等因素带来的误差,根据测量精度,选取的轨道数据为精密定轨星历数据 (precise obrit ephemerides,POD),数字高程模型数据 (digital elevation model,DEM) 为 SRTM1,其分辨率为 30 m。

表 1 卫星影像参数

Tab.1 Satellite image parameters

属性	参数
轨道方向	升轨
成像模式	干涉测量宽幅模式
波段	C
波长/cm	5.6
分辨率/m	5×20
重访周期/d	12
轨道号	26
极化方式	VV

3 反演实验

3.1 方法原理

SBAS-InSAR 技术是通过设置长时间序列的时空基线阈值,将不同时期 $N+1$ 幅影像数据构成 M 个干涉基线对,然后将其进行干涉,得到 M 幅差分干涉图;其中第 i 景差分干涉图中的差分相位 $\Delta\varphi_i$ 可以表达为:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_{t_k} - \varphi_{t_j} = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noi}} ,$$

(1)

式中: φ_{t_k} 为 t_k 时刻的相位信息; φ_{t_j} 为 t_j 时刻的相位信息; φ_{ref} 为参考椭球相位; φ_{top} 为地形相位; φ_{def} 为形变相位; φ_{atm} 为大气相位; φ_{noi} 为随机噪声相位。外部数据和滤波可以削弱干扰形变信息的相位信息,得到粗略形变相位。对于任一像元点的相位值 φ 和该像元点在 M 幅干涉图中的差分干涉相位 $\Delta\varphi$,其向量表达式为:

$$\boldsymbol{\varphi}^T = [\varphi(t_1), \cdots, \varphi(t_N)] ,$$

(2)

$$\Delta\boldsymbol{\varphi}^T = [\Delta\varphi_1, \cdots, \Delta\varphi_M] 。$$

(3)

从上述公式可以看出干涉相位可以表示为 2 个相位值的差,公式为:

$$\Delta\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\varphi} ,$$

(4)

式中 $\boldsymbol{A}$ 的表达式为:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & +1 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & -1 & +1 & \cdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} ,$$

(5)

式中: $\Delta\boldsymbol{\varphi}$ 为任一像元点的相位值向量; $\boldsymbol{A}$ 为差分相位参数矩阵; $\boldsymbol{\varphi}$ 为同一像元点的差分干涉相位值向量。由上述公式可知,当 $\boldsymbol{A}$ 满秩时,可得唯一解,而时空基线条件并不允许一幅影像作为全部基线对的

主影像,故而引起秩亏,这就需要矩阵的奇异值分解法求出最小范数下的最小二乘解,得到相位值,求出平均相位速度;基于此,转化平均相位速度为形变速率。

3.2 数据处理

SBAS-InSAR 是对相干性较高的分布式散射体进行地表形变反演,而雷达影像在数据处理过程中会出现像素级缺值,这种缺值会随基线集数量增加而增加,针对此问题采用分段处理,降低基线集数目,提高有效反演范围。将 2018 年 7 月—2020 年 7 月的雷达影像等时划分为 2 组,分别以 2018 年 12

月 25 日和 2020 年 1 月 13 日时相影像为超级主影像,设置 36 d,10% 的时空基线阈值,如图 2 所示。在干涉处理后,用自适应滤波法减弱斑点噪声,并对滤波后的数据以最小费用流技术进行解缠;再剔除 20 个相干性较差、相位解缠不理想的干涉对组合;对解缠后的数据进行建模,应用奇异值分解方法计算得到形变信息;最后进行地理编码。根据库水位及最大坡度值计算消落带范围,并根据 SBAS-InSAR 反演得到的形变速率划定疑似灾害区;结合遥感影像及实地调查资料,确定地质灾害区,进行多因素时序分析。

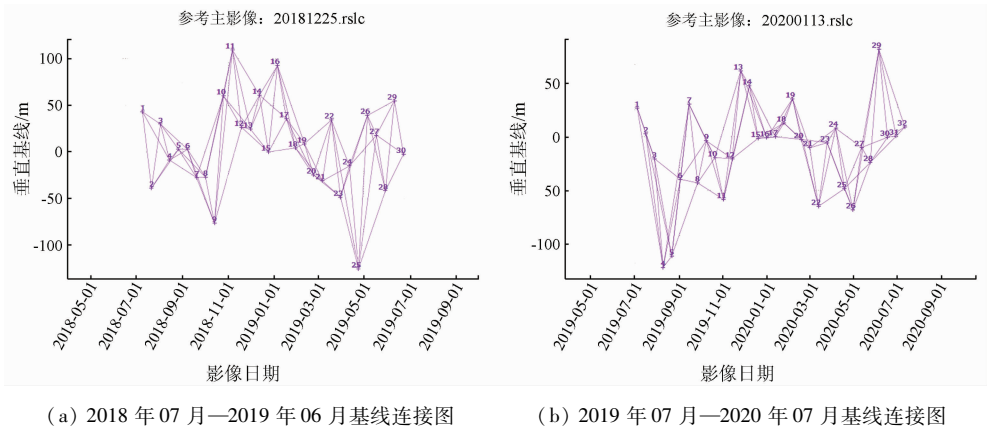


图 2 干涉对连接图

Fig. 2 Connection diagram of interference

4 结果及分析

4.1 整体区域结果及分析

针对奉节县消落带区域 2018 年 7 月—2020 年 7 月的 63 景影像进行数据处理后,反演得到视线向形变结果如图 3 所示。以堆积抬升为正值,滑移下沉为负值,得到整个区域平均形变速率,值为 -5

mm/a; 2 a 的年均形变速率均值处于 -79 ~ 59 mm/a 之间,单年形变累积量最大可达 89 mm;而消落带区域平均形变速率为 -2 mm/a,2 a 形变速率均值处于 -64 ~ 51 mm/a,从形变统计结果中可以得知整个区域及消落带较为稳定,形变速率基本处于 30 mm/a 以内,但在消落带周围存在着 2 个较大形变速率区域(绝对值大于 30 mm/a)。

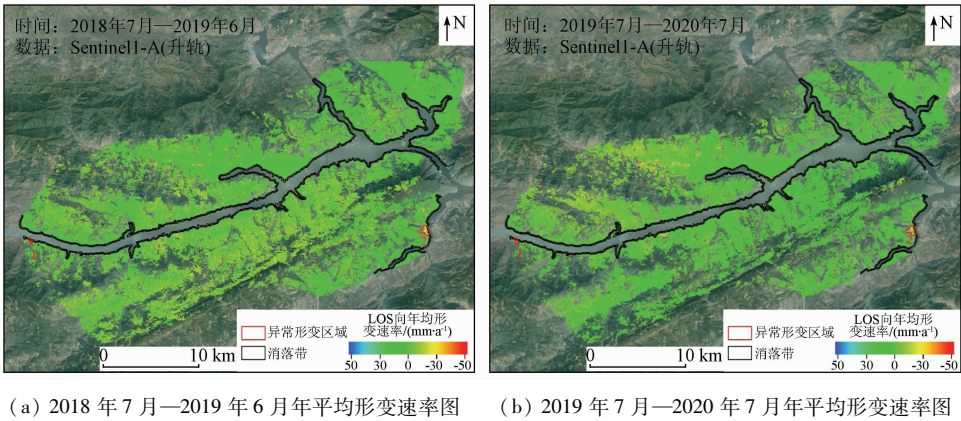


图 3 年平均形变速率图

Fig. 3 Annual average deformation rate map

依据现场调查资料,2 个形变异常区域均含确认的地质灾害点。其中区域 1 育有竹林湾滑坡,位于奉节县安坪镇天鹅村(30°57′46.84″N,109°13′10.64″E),单年最大形变速率达 89 mm/a。区域 2 曾有滑坡记录(徐家屋场滑坡),位于奉节县长江支流大溪河西侧库区(30°58′16.53″N,109°35′30.33″E)永乐镇三丘田,单年最大年均形变速率为 89 mm/a。

4.2 区域 1 时序形变分析

根据 2018 年 8 月现场调查资料显示,观测时间

内区域 1 证实存在地表形变迹象(图 4)。其中图 4(b)中左侧滑坡的反演形变速率显著,右侧滑坡的反演形变速率不明显,这与反演时段和调查时段的不完全重合有关;调查期间 2 处均有滑坡迹象,但调查后期右侧形变量小,趋于平稳,导致年均形变速率不显著。在后续将 2 个实地监测点数据归算至视线向与时序 InSAR 技术处理得到的形变监测结果对比发现(表 2),形变结果与监测结果一致性较好。

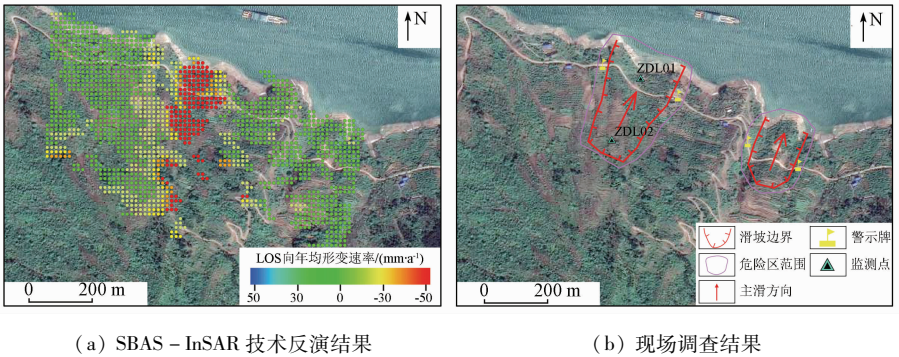


图 4 验证对比图
Fig.4 Verification comparison chart

表 2 数据验证			
Tab.2 Validation of results (mm)			
监测站点 (监测时间 2020-6-5—2020-7-11)	监测站监测 结果(LOS 向)	时序 InSAR 技术 监测结果(LOS 向)	差值
ZDL01	-21.3	-18.8	+2.5
ZDL02	-8.4	-6.6	+1.8

区域 1 育有竹林湾滑坡,为中型土质滑坡,滑坡土体为含碎石粉质黏土,下伏基岩为侏罗系中统沙溪庙组砂泥岩互层。从图 5(a)中可以看出 2018—2019 年区域 1 形变速率从坡体后缘到前缘、从中线到两边逐渐减小;根据与消落带距离的远近,选取 4 个点(L1,L2,L3,L4,如图 5(a)所示),其形变速率

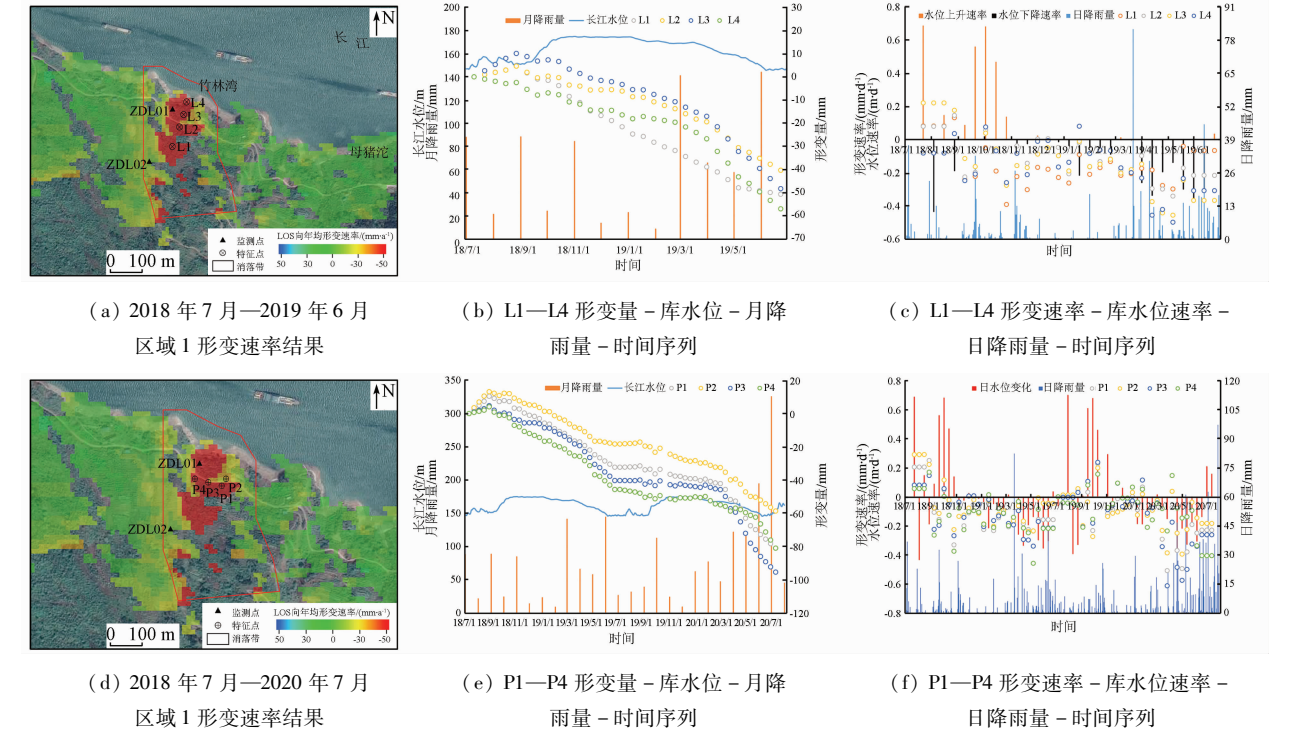


图 5 区域 1 形变过程
Fig.5 Deformation process of region 1

分别为 -50.7 mm/a 、 -40.3 mm/a 、 -48.3 mm/a 和 -56.9 mm/a ，可以发现年均形变速率先减小后增大，即在一定距离内越靠近消落带，形变速率越大。在距离消落带较近的位置选取4个点(P1,P2,P3,P4)，其形变速率分别为 -40.5 mm/a 、 -29.3 mm/a 、 -47.7 mm/a 和 -40.5 mm/a ，表明坡体中部的形变速率高于两边。

由于监测时段均分为2段，2段在时间节点起止上是连续的，所以针对点的形变量分析是将2次处理的结果进行叠加。Sentinel-1 卫星重访周期为12 d，以此为时间间隔计算各点的日均形变速率、日均降雨量和库水位变化速率，构成形变速率-库水位速率-降雨-时间序列(即图5(c),(f))。从图5(c)中可以看出，L1形变速率不随库水位变化而变化，而其余点的形变速率在库水位上升初期、库水位快速下降期间及降雨充沛时较大，形变速率处于 $-0.5\sim -0.2\text{ mm/d}$ ，大于其他时期。其具体分析如下：

1)在低水位时期(6月中旬—9月)，形变速率较为稳定，且随降雨量增加而变大。当库水位处于低水位时期，浮托减重效应^[15]与动水压力^[16]对坡岸的影响小，降雨对形变速率的影响更为显著。在图5(b),(e)中可以看出，除L1外，点的形变量稳定变化，均随降雨增加而变大。从图5(f)中可以看出，当日降雨量为 $1\sim 7.8\text{ mm/d}$ 时，形变速率由约为 0 mm/d 变为 -0.27 mm/d 。

2)在库水位持续上升时期(9月—11月)，形变速率呈现快速—缓慢—快速的变化特征。这是因为初期库水位的上升会带动地下水位上升，坡脚受到地下水位上升带来的浮托力，降低坡体的抗滑力，坡体稳定性下降；随着水位的持续快速上升且渗透性较差的砂泥岩共同导致坡体内外产生较大的水位压力差，压力方向由外向内，有利于坡体的稳定；水位继续上升，坡体内外水位相差不大时，坡体受浮托减重作用凸显，稳定性降低，坡体易下滑。在2018

年期间形变速率均值变化过程为 -0.16 mm/d 、 0.06 mm/d 、 -0.06 mm/d 、 -0.23 mm/d ；而2019年也存在同样的变化历程，分别为 -0.20 mm/d 、 0.05 mm/d 、 -0.21 mm/d 、 0.21 mm/d 、 -0.10 mm/d 。

3)在高水位及水位缓慢下降期间(11月—次年3月中旬左右)，形变速率保持在 0.2 mm/d 内，这期间降雨量较小，水位变化小，坡体较为稳定，但稳定性差于低水位时期。

4)在水位快速下降期间(3月中旬左右—6月中旬)，形变速率主要受库水位下降速率的影响，库水位下降速率大则形变速率大，且会出现一定程度的滞后。这是因为库水位下降时，地下水位高于库水位从而产生水位差，水位差造成渗透压力，压力指向坡外。库水位下降速度越快，由于岩土体对水的滞留，库水位与地下水位之间的水位差越大，产生的渗透压力越大，从而加速坡体形变，在强降雨条件下更容易带来滑坡灾害。以点P1,P2,P3,P4的形变速率为例，2020年3月13—25日，库水位下降速率为 -0.15 m/d ，日降雨量趋于0，其形变速率均值为 -0.44 mm/d ，而在2020年3月25日—4月6日，库水位变化趋于0，日降雨量 2.33 mm/d ，其形变速率均值为 -0.02 mm/d ；在2020年5月12日—24日和24日—5月30日这2个时间段内，日降雨量在 3.34 mm/d 左右，库水位下降速率分别为 -0.19 mm/d 和 -0.31 mm/d ，其形变速率均值分别为 -0.16 mm/d 和 -0.27 mm/d ，可以看出库水位下降速率对于地表形变的影响。

4.3 区域2时序形变分析

区域2坡岸地层为三叠系须家河组，岩体主要为页岩与砂岩，坡岸前缘岩体主要为页岩和泥岩，局部含砂量较高，泥质结构。形变速率较大区域距离消落带较远，呈倒T字型分布。消落带附近也有明显的地表形变，在区域2中选4个形变点P5,P6,P7,P8(图6(a))，其形变速率分别为 -36.6 mm/a 、 -30.9 mm/a 、 -30.3 mm/a 和 -40.2 mm/a ，从空

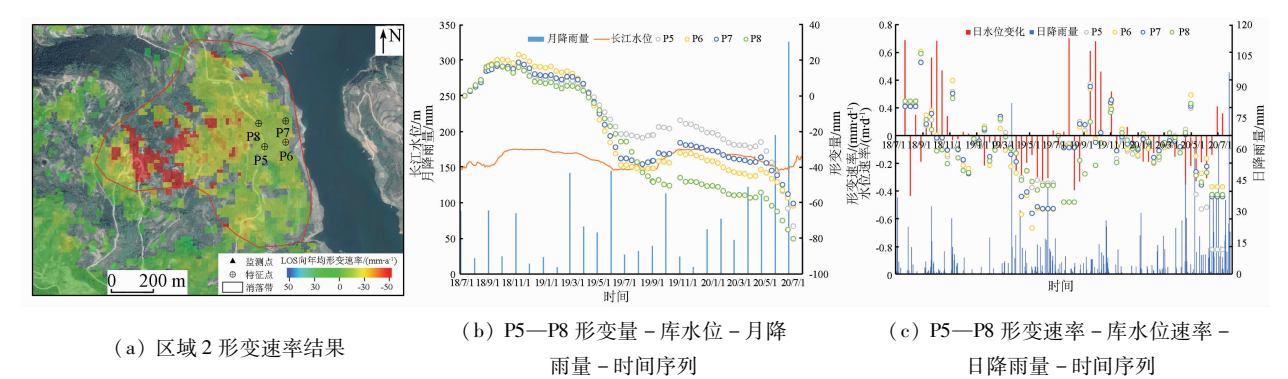


图6 区域2形变过程
Fig.6 Deformation process of region 2

间分布上来看,距离消落带近的形变点形变速率小于距离远的。结合图 6(b),(c)对所选点的详细分析如下:

1)在低水位时期,各点的形变速率较为稳定,且随降雨量增加而变大。在低水位时期,水位较为稳定,对坡岸的影响小,而降雨会减弱抗剪强度同时增加坡体自重导致滑移。以点 P5 为例,观察图 6(b)发现形变量会保持较为稳定的变化,当水位下降速率为 0.11 m/d 时,日降雨量为 1.02 mm/d,其形变速率为 -0.06 mm/d,日降雨量为 4.20 mm/d 时,形变速率为 -0.34 mm/d。

2)库水位上升时期,整体形变较小,形变速率的变化过程为快速—缓慢—快速。该区域坡体渗透性小,地下水位上升慢,受浮托减重效应影响较小,但受坡体内外的动水压力影响显著,其作用力指向坡体,增加了坡体的稳定性,岸坡高处不受水位影响,仍蠕动滑移,带来局部的累积,累积到一定程度会发生较小程度的滑移。2018 年形变量均值为 1 mm,其形变速率均值变化过程为 0.12 mm/d, -0.04 mm/d, -0.15 mm/d,0.32 mm/d; 2019 年形变量均值为 6.85 mm,其形变速率均值变化过程为 0.24 mm/d, -0.06 mm/d,0.22 mm/d。

3)在高水位及水位缓慢下降期间,形变速率基本小于 0.2 mm/d,此时坡体较为稳定。

4)库水位快速下降时期,在降雨量大时,远消落带速率大于近消落带速率,反之亦然,另外形变速率在库水位下降速率递增时变化速率较大。这是因为库水位以与地下水位变换来降低坡体整体稳定性的方式使土体滑移^[16-20],在库水位持续下降时,地下水位随之下降,因岩性渗透性差,会在库水位持续下降时造成坡体内外产生较大的压力差,随递增的库水位下降速率而增大,压力向坡外;此外库水位因下降开始减少对阻滑段的浮托力,从而使得该时期坡体处于不稳定易滑动的状态。以 2019 年与 2020 年相同库水位变化段为例,2019 年日降雨量为 1.65 mm/d,近消落带均值为 -0.53 mm/d,远消落带均值为 0.3 mm/d,当 2020 年日降雨量为 4.31 mm/d 时,近消落带均值为 -0.12 mm/d,远消落带均值为 -0.25 mm/d,进一步来看,在 2019 年该期间,库水位速率逐渐增加,形变速率较为稳定,而 2020 年库水位形变速率波动式变化,其形变速率也呈现波动变化,导致其均值较小,这进一步说明了该区域在该段时间受库水位变化的影响大于降雨因素的影响。

5 结论

文章采用 SBAS-InSAR 技术对重庆市三峡库区奉节段消落带区域坡岸的 2018 年 7 月—2020 年 7 月 63 景 Sentinel-1A 升轨数据进行地表形变反演,得到研究区域 2018—2020 年地表形变结果,同时针对消落带区域坡岸的异常形变区进行水要素时序分析。形成的结论具体如下:

1)库水位变化和降雨是地表形变的重要因素。根据形变量-库水位-月降雨量的时间序列图可知,库水位和降雨与地表形变相关性很大。库水位上升会带动地下水位上升,使得坡体受到浮托减重效应,破坏坡体稳定性;同时坡体渗透性差,使得坡体内外易在库水位变化的情况下产生水位差,库水位上升时产生指向坡里的动水压力,增加坡体稳定性,库水位下降时产生指向坡外的动水压力,降低坡体稳定性。而降雨会减弱坡体的抗剪强度同时增加坡体自重进一步增加形变。

2)降雨与地表形变成正比。在极强降雨条件下,降雨完全主导着地表形变;一般情况下,降雨量大则坡体形变大,反之亦然。降雨还会导致坡体局部滑塌,这也会削弱坡体的稳定性。

3)库水位变化快则地表形变大,库水位变化慢则地表形变小。库水位变化速率大,坡岸的浮托减重效应与动水压力都会增大,而这 2 种作用又与坡体本身的渗透性相关,浮托减重效应和指向坡外的动水压力会降低坡岸稳定性,动水压力向坡里会增加坡岸稳定性;库水位变化速率小,2 种作用力均会变小。

4)研究区地表形变总体稳定,但消落带邻近区域发现 2 个形变异常区域。异常区域年形变速率超过 30 mm/a,区域内最高形变速率可达 89 mm/a。

5)InSAR 技术可快速反演大范围地表形变,但单一的反演结果难以全面解构地表形变的内在机理,结合地质地形等方面的多数据融合才能更充分挖掘地表形变的发生和发展态势及机理,从而为地质灾害精准防治提供科学支撑。

参考文献(References):

[1] 李姗泽,邓 玥,施凤宁,等. 水库消落带研究进展[J]. 湿地科学,2019,17(6):689-696.
Li S Z,Deng Y,Shi F N,et al. Research progress on water-level-fluctuation zones of reservoirs: A review[J]. Wetland Science, 2019,17(6):689-696.

- [2] 黄波林,殷跃平,张枝华,等. 三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(9):1786–1796.
- Huang B L, Yin Y P, Zhang Z H, et al. Study on deterioration characteristics of shallow rock mass in water the level fluctuation zone of karst bank slopes in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1786–1796.
- [3] 杨何,汤明高,许强,等. 三峡库区消落带岸坡岩体劣化特性测试及质量评价[J]. 水利学报,2020,51(11):1360–1371.
- Yang H, Tang M G, Xu Q, et al. Deterioration characteristic test and quality evaluation of bank slope rock mass in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1360–1371.
- [4] 沈振锋,张开金,夏雪,等. 基于文献计量法的三峡库区消落带研究现状及热点分析[J]. 水生生态学杂志,2021,42(1):26–34.
- Shen Z F, Zhang K J, Xia X, et al. Bibliometric analysis of the current situation and hot research topics on the water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(1): 26–34.
- [5] 高磊. 三峡库区巫山段消落带地形变化及地质灾害分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- Gao L. Terrain change and geological hazard analysis of the hydro-fluctuation belt in the Wushan of Three Gorges Reservoir area[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2018.
- [6] 王丰. 奉节消落带岸坡稳定性评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
- Wang F. Stability evaluation of bank slopes in Fengjie[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2019.
- [7] 周剑,邓茂林,李卓骏,等. 三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律[J]. 水文地质工程地质,2019,46(5):136–143.
- Zhou J, Deng M L, Li Z J, et al. Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 136–143.
- [8] 付小林,汤明高,叶润青,等. 不同库水消落方式下动水压力型滑坡变形与稳定性响应研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(1):201–211.
- Fu X L, Tang M G, Ye R Q, et al. Study on deformation and stability of hydrodynamic landslide under different reservoir water fluctuation modes[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(1): 201–211.
- [9] Andrew K G, Richard M G, Howard A Z. Mapping small elevation changes over large areas: Differential Radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1989, 94(B7): 9183–9191.
- [10] 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.
- [11] 姜兆英. 短基线集 InSAR 形变模型的不适定问题解算方法研究[J]. 测绘学报,2020,49(3):399.
- Jiang Z Y. Study on the solving methods of the ill-posed problems of the SBAS InSAR deformation model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(3): 399.
- [12] 海香. 重庆市奉节县地质灾害风险评价及防灾减灾措施[D]. 重庆:西南大学,2008.
- Hai X. A study on risk assessment about geological disasters and hazard prevention and mitigation measures of Fengjie in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [13] 马新建. 三峡库区滑坡堆积体的渗透特性及渗流规律研究[D]. 成都:成都理工大学,2018.
- Ma X J. The study of the permeability characteristics and seepage law of landslide accumulation body in the Three Gorges Reservoir area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [14] 许嘉慧,孙德亮,王月,等. 基于 GIS 与改进层次分析法的奉节县滑坡易发性区划[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(2):36–44,2,142.
- Xu J H, Sun D L, Wang Y, et al. Landslide susceptibility mapping of Fengjie County based on GIS and improved analytic hierarchy process[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 2020, 37(2): 36–44, 2, 142.
- [15] 吴俊峰,罗永红,周亮亮. 浮托减重效应对三峡库区竹林湾滑坡稳定性影响研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(6):48–53.
- Wu J F, Luo Y H, Zhou L L. Study of buoyancy effect on stability of Zhulinwan landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2019, 41(6): 48–53.
- [16] 李永康,许强,董远峰,等. 库水位升降作用对动水压力型滑坡的影响——以三峡库区白家包滑坡为例[J]. 科学技术与工程,2017,17(18):18–24.
- Li Y K, Xu Q, Dong Y F, et al. Influence of reservoir water level fluctuation on typical hydrodynamic pressure landslide: Taking Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoir for an example[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 18–24.
- [17] 黄观文,王家兴,杜源,等. 顾及降雨及库水位因素的滑坡时滞分析与预测——以三峡库区新铺滑坡为例[J]. 地球科学与环境学报,2021,43(3):621–631.
- Huang G W, Wang J X, Du Y, et al. Time-delay analysis and prediction of landslide considering precipitation and reservoir water level: A case study of Xinpu landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(3): 621–631.
- [18] 闫怡秋,郭长宝,张永双,等. 基于 SBAS-InSAR 技术的西藏雄巴古滑坡变形特征[J]. 地质学报,2021,95(11):3556–3570.
- Yan Y Q, Guo C B, Zhang Y S, et al. Study on the deformation characteristics of Xiongba ancient landslide based on SBAS-InSAR method, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11): 3556–3570.
- [19] 朱同同,史绪国,周超,等. 利用 2016–2020 年 Sentinel-1 数据的三峡库区树坪滑坡稳定性监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1560–1568.
- Zhu T T, Shi X G, Zhou C, et al. Stability monitoring and analysis of Shuping landslide in Three Gorges Area with Sentinel-1 images from 2016 to 2020[J]. Geomatics and Information Science of Wu-

han University,2021,46(10):1560-1568.

[20] 王尚晓,李士垚,牛瑞卿. 木鱼包滑坡形变特征的 InSAR 监测分析[J]. 长江科学院院报,2022,39(4):77-84.

Wang S X, Li S Y, Niu R Q. Monitoring slope displacements of Muyubao landslide using InSAR analysis technique[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(4):77-84.

A time – series InSAR – based analysis of surface deformation of hydro – fluctuation belts and the effects of hydrological elements

PAN Jianping, FU Zhanbao, DENG Fujiang, CAI Zhuoyan, ZHAO Ruiqi, CUI Wei
(School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Hydro – fluctuation belts are frequently struck by geological disasters. Therefore, ascertaining the effects of hydrological factors such as reservoir water level and rainfall on the surface deformation of these belts is of great significance for the early warning, prevention, and control of geological disasters. Based on 63 scenes of Sentinel – 1 ascending images of the Fengjie section of the Three Gorges Reservoir Area from July 2018 to July 2020, this study conducted the inversion of surface deformation using the small baseline subset interferometric synthetic aperture Radar (SBAS – InSAR) technique. The inversion results were compared with the data of ground monitoring points, and the hydrological elements were analyzed using the time series diagrams of deformation, reservoir water level, and monthly rainfall. The conclusions are as follows: ① The change in the reservoir water level and rainfall are important factors causing surface deformation. The effects of the change in the reservoir water level on the slope are primarily reflected in the buoyancy effect and the water level difference inside and outside the slope. In comparison, rainfall can decrease the shear strength and increase the dead weight of the slope, thus further increasing the deformations; ② Quicker change in the reservoir water level corresponds to larger surface deformation, and vice versa; ③ Rainfall is directly proportional to surface deformation and totally dominates the surface deformation in the case of extremely heavy precipitation; ④ The surface of the study area is stable overall. However, two deformation anomaly zones have been found near the hydro – fluctuation belt. They have annual deformation rates of over 30 mm/a, with a maximum of up to 89 mm/a within the anomaly zones. The above conclusions have high theoretical and practical values and can provide scientific support for the accurate prevention and control of geological disasters in hydro – fluctuation belts.

Keywords: hydro – fluctuation belt; hydrological element; deformation mechanism; SBAS – InSAR; Fengjie section of Three Gorges Reservoir

(责任编辑: 李 瑜)