

引用格式: XIAO Hongmin, ZHANG Wenjiang, TIAN Yunfeng, *et al.* Controls underlying the aspect pattern of SBAS-InSAR retrieved surface subsidence in the Upper Minjiang Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(4): 967-977. [肖洪敏, 张文江, 田云锋, 等. 基于SBAS-InSAR方法的岷江上游峡谷区地表沉降的坡向分异规律研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(4): 967-977.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0967

基于SBAS-InSAR方法的岷江上游峡谷区地表沉降的坡向分异规律研究

肖洪敏¹, 张文江¹, 田云锋², 蒋蕙如¹, 朱强³

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065;

2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;

3. 中国长江三峡集团有限公司信息中心, 北京 100038)

摘要: 岷江上游峡谷区滑坡等地质灾害频发, 认识灾害的分布特征及诱因对于减小灾害损失具有重要意义。基于2015~2019年的60景哨兵一号(Sentinel-1A)卫星雷达影像, 采用小基线集合成孔径雷达干涉测量(SBAS-InSAR)方法获取了地表雷达视线向形变的时间序列及多年平均速率, 分析了地表沉降的分布规律及其同植被覆盖、降水、人类活动等因子的内在联系。结果表明: 研究区地表沉降具有明显的坡向分异规律, 即快速沉降区多分布于阳坡, 年平均沉降速率(-33.02 mm/a)明显快于阴坡(-9.33 mm/a)。针对该地表沉降的坡向分异规律, 研究进一步揭示了其环境控制机制: ①阳坡水分条件胁迫较强而植被覆盖差, 不利于地表稳定; ②地形雨来向多为偏南方向, 阳坡受侵蚀较为强烈; ③阳坡光热条件好, 受垦殖等人类活动影响大。由此建议: 在岷江上游峡谷区的偏南向边坡, 应特别注意防范滑坡等灾害, 加强地表形变监测和滑坡灾害预警。

关键词: 地表沉降; 干涉合成孔径雷达; 坡向差异; 水热条件; 岷江上游

中图分类号: P237; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)04-0967-11

1 引言

地处青藏高原东缘的岷江上游峡谷地区, 在汶川地震后滑坡等地质灾害频发^[1]。加强该地区的地表形变监测, 在区域尺度上认识地表形变空间分布规律, 有利于提高地质灾害防治能力。目前滑坡运动监测主要依赖地表点位上的形变观测, 例如金继军等^[2]通过布设钻孔测斜仪、地表GNSS(Global Navigation Satellite System)监测点, 研究外力条件对周阳坪滑坡复活的作用; 叱伟康等^[3]则利用点位GPS监测方法, 分析了白亚滑坡体的位移空间特征。此类基于点位的形变测量位置准、精度高, 有

助于理解地质灾害发生的动力学机制, 可提供实用的相关预警指标^[4], 但仅依赖地表点位方法不能有效监测区域尺度的地表形变及其空间分布规律^[5]。而卫星合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)方法, 具有区域性和周期性等优势, 已被应用于地质灾害监测等领域^[6-8]。因此, 针对地形、植被、气候等空间差异显著的山区(如岷江上游), 结合星载合成孔径雷达(SAR)观测结果和气候、环境特征等, 可在区域尺度上有效分析地表形变、滑坡灾害的空间分布规律及其影响机制^[9-10]。

同GPS和水准测量等传统调查方法相比, In-

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2022-07-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771112)资助。

作者简介: 肖洪敏(1996—), 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害研究。E-mail: xhm1996sc@163.com

通讯作者: 张文江(1976—), 男, 四川成都人, 教授, 主要从事生态水文及遥感应用研究。E-mail: zhangwj@lreis.ac.cn

SAR方法具有大范围、高精度、全天候、高效等探测优势,其原理为计算两景不同时相SAR影像的干涉相位来获取目标地区的微小地表形变信息,是滑坡监测与识别的有效手段^[11-13]。但是,InSAR方法的应用受到时空失相关、轨道误差、大气延迟等误差源的限制,并只能监测单次形变量,而无法获取长时间序列的缓慢形变过程^[12]。以小基线集(Small Baseline Subset, SBAS)等为代表的多时相InSAR方法克服了这类问题,促进了对地表形变时空演化监测的研究^[5]。Berardino等^[14]2002年提出小基线集方法,成功应用于Campi Flegrei火山口的长时序地表形变监测。徐亚会^[15]利用该方法成功追溯了岷江上游新磨村滑坡的灾前形变,聂兵其^[16]也利用小基线方法提取了同地面观测相一致的川西亚喀则滑坡形态特征。张诗茹等^[10]尝试了采用小基线方法对一定区域范围内的历史滑坡进行监测分析,为区域监测提供了有益借鉴。可见,针对地形起伏较大的高山区,SBAS-InSAR方法不仅可以在区域尺度上获取长时序的缓慢地表形变信息,而且在潜在滑坡识别、已知滑坡监测等方面具有较大的应用潜力。上述研究侧重于灾前形变特征的分析,和滑坡易发区的位置识别,而结合气候和环境因子探究形变或滑坡的环境诱发因素,则更利于系统认识变形失稳引发的地质灾害的成因和机制,这对于典型山区形变相关地质灾害的减灾防灾非常重要。

预防或减轻地质灾害需要全面认识灾害体的分布特征、动态变化、以及影响因素和机制。相关研究已表明,滑坡诱发因子包括暴雨、坡面形态、人类活动、新构造运动、植被和气候等^[17-21]。特别地,坡向被认为在地表稳定性中具有重要作用,因为坡向会显著影响日照、温度和蒸发等,进而又影响母岩风化、土壤发育及植被覆盖等,近地表稳定性与之关系密切^[22]。岷江上游地质灾害形势严峻,区内滑坡多为大型古滑坡,形变速率较缓慢、孕灾环境复杂,利用传统方法开展大范围的实地调查监测比较困难,不易探究区域尺度滑坡灾害的诱因^[15-16]。因而可利用卫星遥感的空间优势,分析区域尺度上的地表形变、探究滑坡灾前形变与生态环境因子之间的联系。为此,实验首先基于Sentinel-1A卫星雷达影像,采用SBAS-InSAR方法获取2015~2019年的地表形变场,分析已知滑坡体的运动、探测潜在的滑坡隐患区,研究地表形变显著的滑坡高风险区空间分布特征,然后在区域尺度上探讨滑坡分布

与环境因子的内在关系,以期为区域地质灾害的减灾工作提供科学支持。

2 研究区及方法

2.1 研究区与数据

岷江上游指都江堰以上的岷江流域(图1),位于青藏高原东缘自高原到四川盆地的过渡地带,空间范围为 $31^{\circ}2'30''\sim 32^{\circ}37'41''$ N、 $102^{\circ}36'40''\sim 104^{\circ}33'45''$ E,区内有龙门山断裂带、岷江断裂等多条活动断裂分布,为高山峡谷地貌,是地质灾害多发区^[23]。研究区内地势大体自东南向西北抬升,地形起伏大,坡陡水急,河道平均比降为7.5‰^[19];属北半球亚热带气候,受太平洋东南季风、印度洋暖流和西伯利亚西风气流等共同影响,河谷气候干燥,蒸发旺盛;茂汶段是典型的半干旱河谷区,降水时空分布不均,生态环境对人为扰动敏感^[24-25]。研究区新构造活动强烈,区内及附近强地震频繁,如1933叠溪、1976松潘、2008汶川以及2017九寨沟等强烈地震,破坏了山体岩层结构和稳定性,产生了大量的松散物质,潜在地质灾害分布广泛而隐蔽^[10,15]。

研究选取了60景Sentinel-1A升轨(轨道号为128)影像(2015/11/26~2019/10/12),系干涉宽幅(IW)模式和VV单极化方式,时间间隔为24 d;使用了9个GNSS台站(图1)的速度场(1999~2020年)对InSAR形变场的精度进行验证,用于验证的InSAR格点是GNSS台站所在格点(采样分辨率为50 m)。采用ASTGTM2数字高程(30 m)提取研究区的海拔、坡向和坡度等信息。为分析区域形变与土地覆被的联系,实验采用MODIS土地覆盖产品(500 m)和Landsat-8 OLI影像(30 m),获取研究区植被信息。

2.2 形变监测方法

小基线集(SBAS-InSAR)方法,通过对同一研究区的长时序SAR影像设定较短的时空基线阈值,挑选出多个主影像组成的干涉对,结合轨道参数去除平地相位,并利用高程数据消除地形相位,滤波减噪提高信噪比。然后由相位解缠确定干涉相位的整周未知数,利用最小二乘法和奇异值分解法估算形变参数,并基于残差估计大气相位,最终得到高精度的长时序地表形变信息^[26-30]。相较于差分干涉(D-InSAR)和永久散射体(PS-InSAR)等其他多时相InSAR方法,该方法不仅提高了精确估算地表

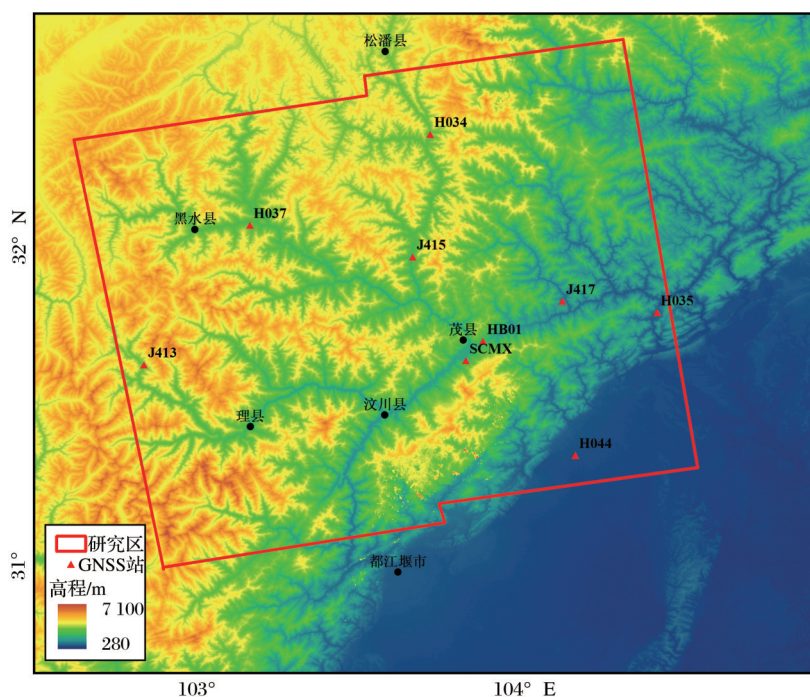


图1 研究区位置及GNSS站分布

Fig.1 The locations of study area and the GNSS stations

形变的能力(亚毫米级),而且克服了单一主影像造成的干涉对相干性可能较差的缺陷,也降低了对SAR影像的数量需求,提高了运算效率,因而被广泛应用于高山峡谷区的滑坡监测^[12,26]。

研究采用开源软件GMTSAR处理SAR影像^[30-32],结合POD精密定轨星历数据修正观测影像的卫星轨道信息。以2017年10月22日影像为主影像与其他所有影像进行配准,分别设定时空基线阈值为130 d和100 m,共生成241组干涉对(图2)。然后进行干涉处理,在距离向和方位向进行8:2多视处理,最终影像空间分辨率为50 m×50 m,并利用外部高程信息消除地形相位。采用高斯(Gaussian)滤波器降低斑点噪声的影响。对干涉相位进行掩膜处理,剔除低相干像元点。最后利用Snaphu程序进行相位解缠,由SBAS分析获得沿雷达视线(Line of Sight, LOS)方向的形变时序和平均速率。

InSAR监测获取的是雷达视线(LOS)方向的

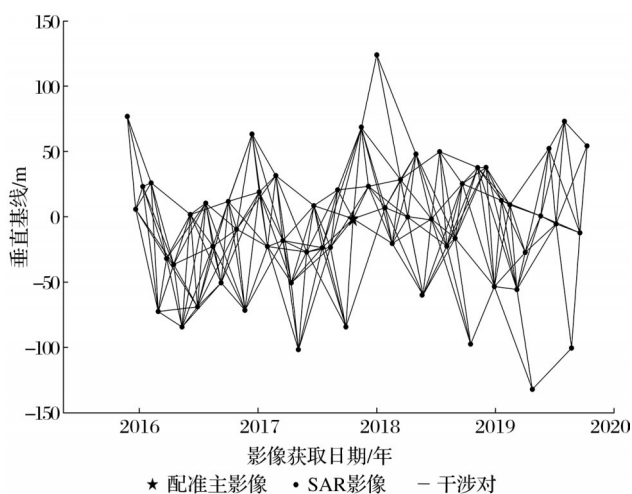


图2 干涉对时空基线

Fig.2 Spatial-temporal baselines of the interferograms

形变信息,但山区滑坡大多是沿着坡面运动^[10]。为了更好地反映坡面形变,研究根据公式(1),将InSAR监测的LOS向形变速率投影换算到坡面方向^[33-34]:

$$V_{\text{slope}} = \frac{V_{\text{LOS}}}{\sin \alpha \cos \varphi} (\sin \theta \cos \alpha_s) - (\cos \alpha \cos \varphi) (\sin \theta \sin \alpha_s) + \sin \varphi \cos \theta \quad (1)$$

其中: V_{slope} 为坡面方向形变速率; V_{LOS} 为基于InSAR获取的LOS向形变速率; α 为坡面坡向; φ 为坡面坡度; θ 为卫星视角; α_s 为卫星飞行方位角。

2.3 坡向划分与植被表征

不同坡向接受的太阳辐射差异很大,导致水热条件有规律性分异,可能会引起地表形变的坡向差

异^[22],因此本研究统计了不同坡向的形变速率。按照坡面朝向,将坡向划分为东北坡(22.5°~67.5°)、东坡(67.5°~112.5°)、东南坡(112.5°~157.5°)、南坡(157.5°~202.5°)、西南坡(202.5°~247.5°)、西坡(247.5°~292.5°)、西北坡(292.5°~337.5°)、北坡(337.5°~360°,0°~22.5°)。为方便分析,将东南坡、

南坡和西南坡合称为阳坡,将东北坡、西北坡和北坡合称阴坡。

坡面植被在降水截留、水土流失、滑坡侵蚀等方面具有显著影响,并且与植被的类型、覆盖度等密切相关^[22]。本研究根据MODIS土地覆盖数据产品和Google Earth影像,区分典型区林地、灌丛、草地、农作物等主要植被覆盖类型,并利用Landsat-8 OLI影像计算归一化植被指数而得到植被覆盖度。采用水土流失方程中的植被覆盖因子(C ,无量纲,介于0~1,高值表示保护作用弱),定量表达植被特征对坡面稳定性的作用^[35-37]。

3 结果分析

3.1 InSAR 结果验证

为了检验SBAS-InSAR监测结果的精度,将其与9个地面GNSS台站测值进行对比。尽管GNSS资料同InSAR的观测时段不完全重合,但GNSS台站多位于稳定的地点,观测期间运动速率未发生较大变化,可以用于InSAR监测结果的验证^[38]。图3对比分析表明,同名站点的GNSS、InSAR形变速率有较高的一致性($R^2=0.57, p<0.01$);与GNSS测值相比,在InSAR结果中存在0~2 mm/a的系统性偏差,可能源自InSAR与GNSS观测基准的差异,但该值接近于InSAR技术的观测误差水平,不影响实验针对滑坡形变的探测结果。

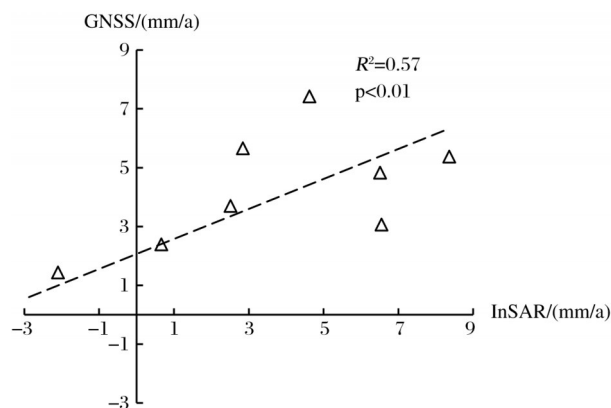


图3 GNSS与InSAR形变速率监测结果比较

Fig.3 Comparison of deformation rate between the GNSS and InSAR results

实验InSAR监测结果与研究区内历史滑坡的研究成果也基本吻合(图4)。谢帅^[39]利用ALOS-2卫星数据(2016~2017年)提取的飞虹桥滑坡和水草坪滑坡形变特征,同本文监测结果大体一致,都显示两处滑坡的最大沉降分别位于滑坡后缘、上缘。本文的监测结果,也显示了汶川地震之后的大光包巨型滑坡^[40],仍表现出明显的沉降特征(0~25 mm/a),而桃坪古滑坡^[41]也形变活跃(0~30 mm/a),应予以重视。上述验证结果表明,实验采用的SBAS-InSAR方法能较好地监测地表形变,所得结果的精度可信。

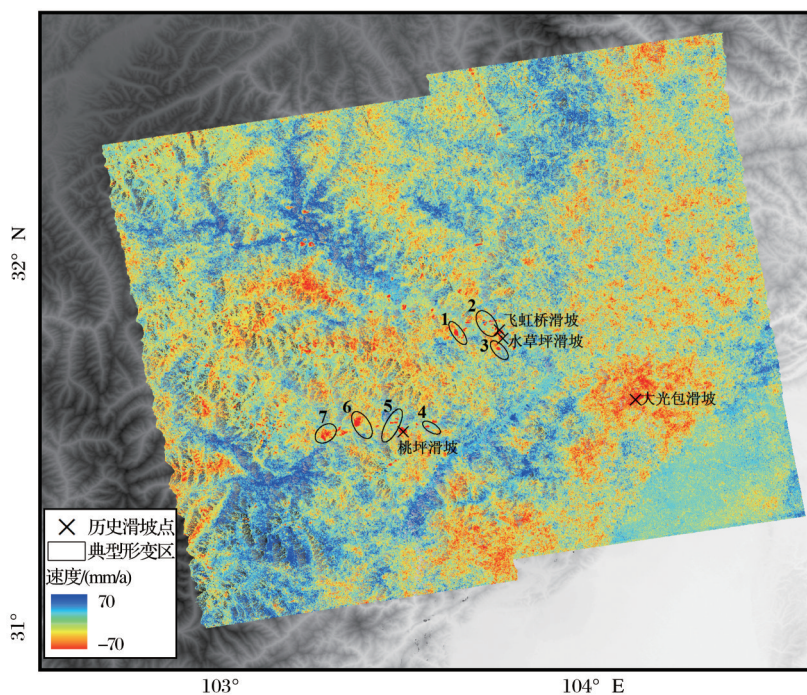


图4 研究区雷达视线(LOS)方向形变速率(负值表示沉降)

Fig.4 The deformation rate in radar Line-Of-Sight (LOS) direction (Negative denotes subsidence)

3.2 地表形变分布特征

实验利用SBAS-InSAR方法监测得到的研究区雷达视线(LOS)方向形变速率如图4所示,显示研究区整体形变速率较小,集中在 $-14\sim 12\text{ mm/a}$,但空间差异较大,沉降速率大的区域呈条带状、大体沿着典型河谷分布;若干区域具有快速下沉趋势,沉降速率最快可达 -68 mm/a ,沿坡面的形变非常明显,可能为滑坡体等。

为了有效地指示坡面形变,本研究将雷达视线方向的形变速率分解到坡面方向。剔除明显不符合重力作用规律(如沿坡面向上移动)和平坦地区(重力稳定)的形变点后^[42-43],得到研究区的坡面方向形变速率 V_{slope} (图5)。研究区的坡面沉降速率主要在 $-15\sim 0\text{ mm/a}$ 之间变化,平均值为 -8.77 mm/a ,大部分区域无明显下沉趋势;部分边坡下沉速率较高,坡面下沉速率超过 -50 mm/a 。

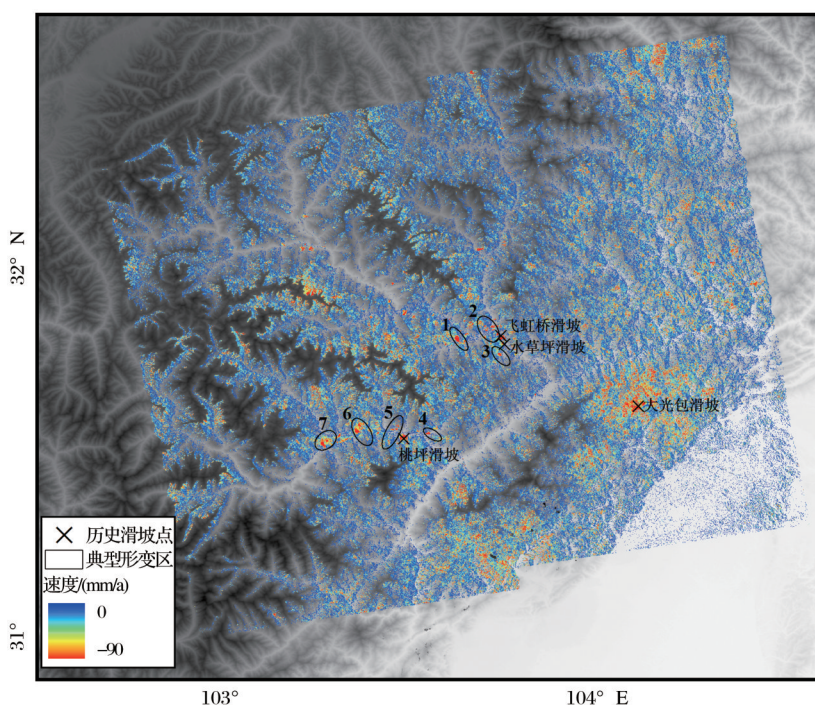


图5 研究区坡面形变速率 V_{slope} (负值表示沿坡面方向下滑)

Fig.5 The deformation rate in the line-of-slope (V_{slope}) direction in the study area (negative value indicates sliding downward)

研究区的坡度及高程特征没有明显的坡向差异。各坡向的山体面积比重在 $9\%\sim 15\%$ 之间,分布较均衡:东南坡占比稍高(15%)、西坡占比较低(9%);各坡向的平均坡度均为 $\sim 30^\circ$,南坡略缓为 28° (图6(a))。就沉降点而言,不同沉降速率范围的形变点,坡度分布特征相似,集中在 $20^\circ\sim 40^\circ$ 之间。其中约 70% 形变点的坡面沉降速率介于 $-10\sim 0\text{ mm/a}$,坡度集中于 $15^\circ\sim 40^\circ$,其余 30% 的形变点坡度集中于 $20^\circ\sim 45^\circ$ (图6(b))。在高程方面,各坡向的平均高程大体为 $2\,600\sim 2\,700\text{ m}$,也无明显差异。但是,图6(a)显示了研究区内部分形变点下沉快速($V_{\text{slope}} < -50\text{ mm/a}$),且具有明显坡向差异,主要集中在偏南坡向:近 40% 的快速沉降点分布在南坡,另有 14% 分布于西南坡,其他坡向(除西北坡有 22%)快速沉降点分布相对较少。

3.3 地表形变影响因子分析

根据坡面形变速率 V_{slope} 结果,研究选定了7处沉降速率较大、下沉点位较集中的典型形变区(图5),以分析形变分布特征与自然环境因子和人类活动因子的关系。其中,自然因素考虑了坡向、高程、植被、降水和坡度等,人为扰动则重点考虑了农田垦殖和居民点等。

3.3.1 地形

典型形变区的坡面形变速率,总体表现为阳坡(平均 -33.02 mm/a)比阴坡(-9.33 mm/a)沿坡面下沉更快(图7)。在形变区1,阳坡沉降速率($-81\sim -16\text{ mm/a}$)的绝对值远大于阴坡($-19\sim -5\text{ mm/a}$);形变区5~7的阳坡沉降速率约为阴坡对应高程段的3倍。但是,这种坡向差异似乎随高程变化而改变:形变区2和3沉降速率的坡向差异,随海拔升高而分别减弱和增强。形变区4则不同于其他典型区,

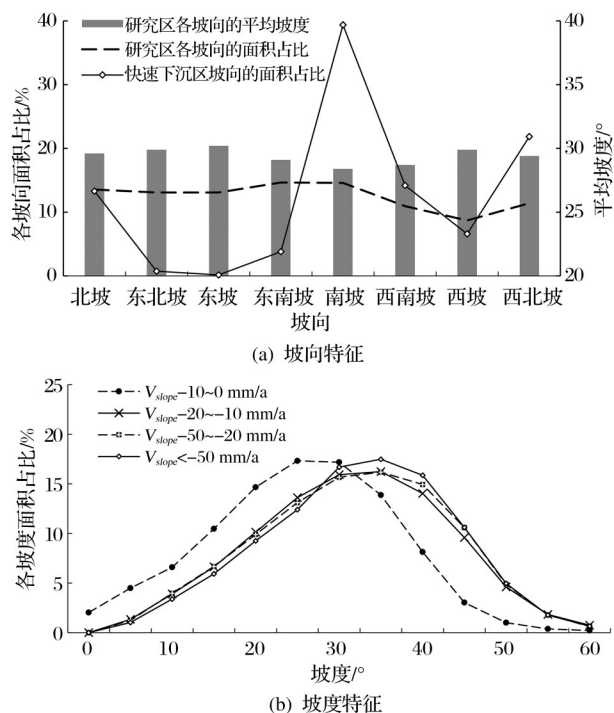


图 6 研究区和快速沉降点的坡向和坡度特征

Fig.6 Characteristics of slope and aspect for the whole study area and the distinct subsidence points

在低海拔段阳坡沉降快于阴坡,分别为-23 mm/a和-14 mm/a,而高海拔段则阴坡沉降较快。地表沉降的坡向差异同海拔的这种联系,可能内在受植被等局地条件的海拔差异控制。

3.3.2 植被

植被是滑坡体稳定性的重要影响因子,一般地,植物根系不仅可以凝聚土壤颗粒,还能增强土壤水的渗透性,减少表层土流失,从而有利于坡面稳定^[22,44-45]。研究区的植被覆盖具有明显的坡向差异:阴坡植被覆盖度高,并以林地为主,而阳坡则是以不同覆盖度的草地类型为主。如表 1 所示,除了

形变区 5,其他形变区的阴坡林地覆盖度在 70% 以上,而阳坡的林地覆盖度低,以草地和垦殖农用地为主。

就植被类型而言,森林和灌木根系的生物量和分布深度,通常远大于草本和农作物,因而前者更有利于增强和维持地表的稳定性。研究区属于我国西南地区的干暖河谷^[46],受到一定程度的水分条件限制。阳坡较为充足的太阳辐射,虽然有利于植被生长,但也可能因蒸散发强而加剧了水分条件的限制,导致偏南坡向水热组合控制的生态适宜度不如阴坡,因而自然植被覆盖条件要差一些。可见,研究区由于水热组合的坡向性分异,导致了植被类型及覆盖度的坡向差异,进而影响了不同坡向的近地表稳定性。

植被覆盖因子(C),可定量表征植被覆盖对近地表稳定性的维护作用^[35-37]。实验根据典型形变区基于 Landsat-8 OLI 提取的植被覆盖度,计算了 7 个形变区阴阳坡的植被覆盖因子。图 8 表明,形变区坡面沉降速率与植被覆盖因子具有很高的相关性($R^2=0.85, p<0.005$)。综合表 1 和图 8 可以发现,森林面积比重大和郁闭度高的坡面,近地表沉降速率相对较低,例如除了形变区 5(灌丛比重大)之外的阴坡,森林覆盖率均在 70% 以上,坡面沉降速率在-17.24 mm/a 以内。相反地,各阳坡的森林覆盖率不及 11%,而草地面积占比接近一半,坡面平均沉降速率-33.02 mm/a,明显快于阴坡的-9.33 mm/a。可见,森林及灌木覆盖在一定程度上提高了坡面的稳定性,因而研究区的坡面沉降表现出了显著的坡向分异规律—水热因子控制的植被覆盖特征是该分异规律的重要影响因素。

3.3.3 降水

降水作为重要的气候条件,同坡面地表稳定性

表 1 典型形变区的植被分布(面积占比)

Table 1 Area fraction of vegetation covers in the typical deformed zones										
	$V_{slope}/(mm/a)$	阳坡				$V_{slope}/(mm/a)$	阴坡			
		林地	灌丛	草地	作物		林地	灌丛	草地	作物
形变区 1	-60.96	10%	14%	76%	-	-7.94	85%	7%	3%	5%
形变区 2	-21.60	6%	18%	56%	20%	-6.69	86%	2%	12%	-
形变区 3	-33.61	9%	19%	47%	25%	-7.86	87%	-	13%	-
形变区 4	-24.04		3%	85%	12%	-13.40	71%	11%	18%	1%
形变区 5	-25.49	-	-	100%	-	-6.46	34%	47%	19%	-
形变区 6	-38.29	2%	23%	49%	26%	-17.24	93%	4%	3%	-
形变区 7	-29.37	11%	12%	50%	26%	-11.55	100%	-	-	-
平均值*	-33.02	10%	10%	62%	18%	-9.33	84%	7%	7%	2%

注: *为平均值,是两类坡向所有沉降点分别的平均值

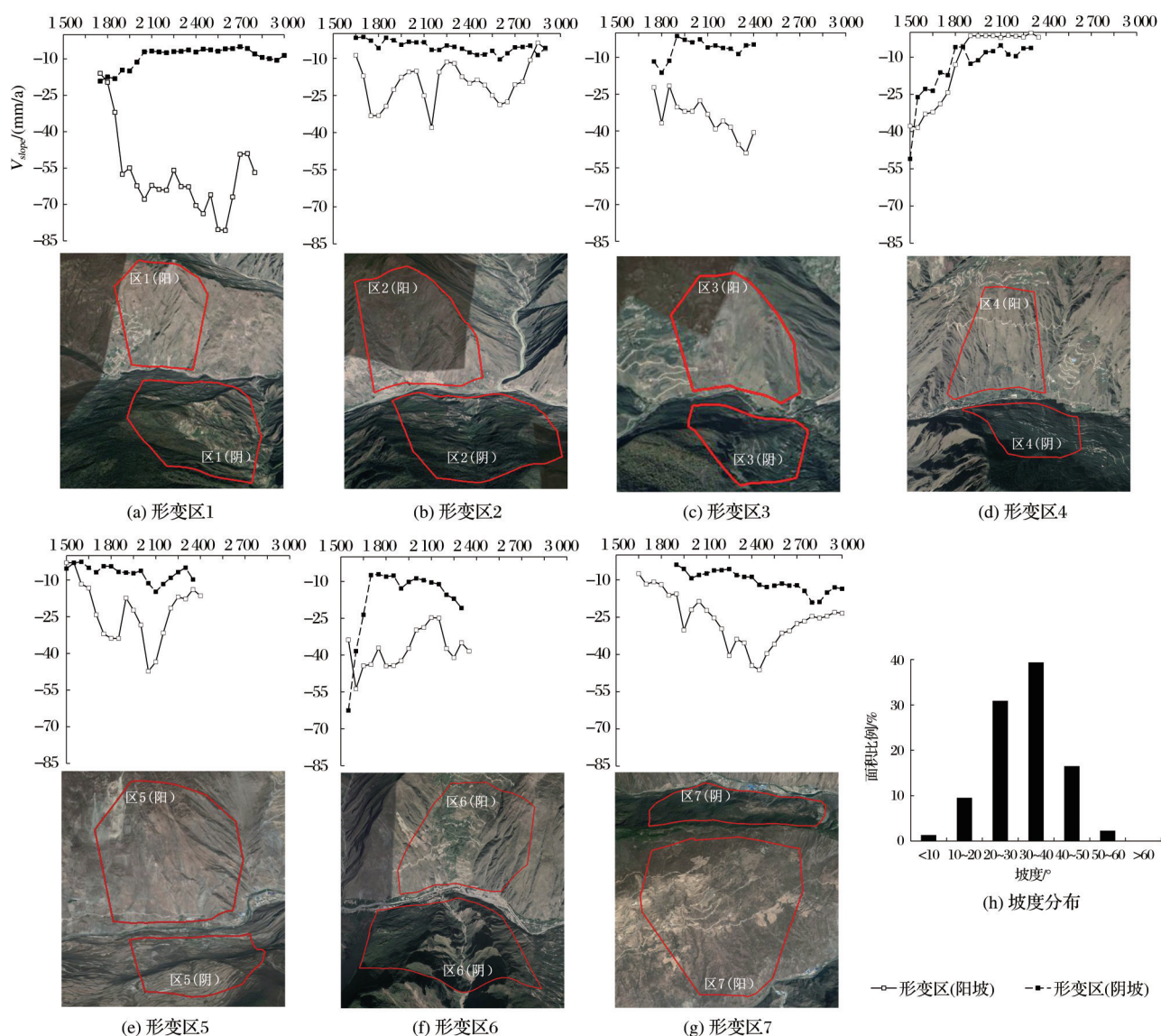


图7 典型形变区沉降-高程分布及谷歌影像截图和所有形变点的坡度分布

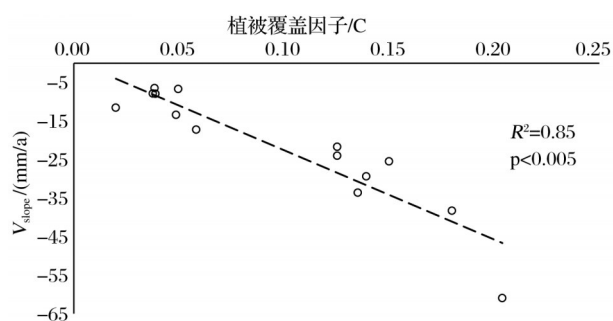
Fig.7 The variations in V_{SLOPE} and elevation for the typical deformed zones with Google Earth derived images, and their slope distribution

图8 典型形变区沉降速率—植被覆盖因子(C)散点图

Fig.8 The V_{SLOPE} and vegetation cover factor C for the typical deformed zones

也有密切的内在关系。适量的有效降水,可促进植被生长,抑制水土流失和坡面沉降,有助于地表稳定。但是当降水过度集中或强降水比重大时,不仅

削弱了降水的有效性,而且会对坡面形成冲刷,容易导致水土流失和坡面失稳^[22]。研究区从南向北的都江堰、黑水、松潘和若尔盖4个气象站,年降水量分别为1 186 mm、822 mm、710 mm和641 mm (1957~2008年),呈逐渐递减的趋势(表2),表明该地区降水主要是向北推进,也即降水来向为阳坡方向。该地区受东亚及南亚季风的共同影响,约70%的年降水发生在6~9月。如表2所示,研究区的降水不仅高度集中于夏季,而且强降水比重很大,大于10 mm/日的累积降水量占到年降水的45%以上,并且日降水量超过50 mm的暴雨事件,在夏季也时有发生。值得注意的是,该地区阳坡因迎风坡效应,坡面降水强度和频度很可能比所选气象站

(位于河谷)更大。因此,阳坡虽然降水量相对较多,有助于植被生长,但由于强度大而削弱了其水分补给的有效性,并且对坡面还有冲刷破坏作用,不利于坡面稳定,这也是研究区地表沉降坡向分异的影响因素之一。

表 2 研究区气象站的降水特征

Table 2 Precipitation characteristics of the study area

	年降水量/ mm	6~9月降水量 比重	≥10 mm/日降水的 累积量比重
都江堰	1186	76%	69%
黑水	822	67%	54%
松潘	710	67%	45%
若尔盖	641	81%	50%

3.3.4 人类活动

在典型山区,由于气候和植被条件的坡向差异,人类活动也一定程度表现出坡向特征。阳坡较好的光热、通风条件,比阴坡更适宜农业生产和人类活动,因而居民点主要分布在阳坡,如图 7 中典型形变区 3、6 的阳坡居民点非常密集;坡耕地也主要位于阳坡,如表 1 所示,典型形变区阳坡的耕地面积占比(18%)明显高于阴坡(2%)。这种土地利用的坡向差异,导致阳坡垦殖、耕作活动强度大,坡面原生植被受到干扰甚至被破坏,削弱了坡面的抗侵蚀能力,加剧了水土流失^[22]。同时,由于坡地垦殖比重大,阳坡的居民地、乡村道路、电力通讯线路等对地表稳定性的负影响,也必然远大于阴坡。因此,人类活动也是导致研究区阳坡沉降速率偏大的原因之一。此外,图 7 中的典型形变区 5~7,不仅是脆弱的历史滑坡区^[47],而且过境的公路、隧道等工程活动扰动^[23],也不利于坡面稳定。

4 讨论与结论

4.1 讨论

首先,坡面的稳定性同重力作用直接关联,理论上坡度越陡稳定性越弱。实验的坡度分析结果显示,研究区内的所有沉降点,坡度集中在 20°~40°之间(图 7(h)),同历史滑坡的坡度分布范围基本一致^[17,48]。该结果表明并不是坡度越大越易诱发沉降,坡度太陡时发生重力崩塌的几率更大^[26]。实际上只是在一定的坡度范围内,陡坡易发生沉降甚至滑坡。如图 6(b)所示,沉降速率介于-10~0 mm/a 的形变点主要分布在 15°~40°,而沉降速率超过-50 mm/a 的快速下沉点则集中于更陡的 25°~45°区间。

其次,研究区内复杂的地质条件和构造活动等,是触发地表沉降、滑坡发生的区域共性因素。岷江上游地区岩体破碎、岩性软弱,抗风化能力弱,被划分为滑坡易发的岩浆岩、中厚层灰岩—板岩、千枚岩—板岩—薄层灰岩和变质砂岩—板岩等岩组^[26,47],而且受虎牙断裂、岷江断裂和龙门山逆冲推覆构造带影响^[19,49]。这种地质构造和母岩抗蚀特征,对地表稳定性的影响是区域性的。研究显示地表沉降的坡向等外在因素,则是叠加在地质共性条件之上的环境诱因,形成了地表稳定性的小尺度(坡面)空间分异。

最后,本研究结果表明,植被条件较好的区域,土壤抗侵蚀能力较强,地表沉降速率小、滑坡发生几率低(图 8)。但该结果可能体现为植被对浅层滑坡的遏制作用,部分研究认为植被对深层滑坡有显著的促进作用,并且在暴雨条件下高覆盖度的植被加重了滑坡体的负载、更易诱发滑坡^[22]。在区域尺度上,植被对于不同类型地表稳定性的影响以及其他关联因素有待进一步研究。

4.2 结论

研究利用 SBAS-InSAR 方法处理了 2015~2019 年 Sentinel-1A 卫星共 60 景 C 波段雷达升轨 SLC 影像,提取了岷江上游高山峡谷区近 5 a 来的多年平均地表 LOS 向形变场,并结合卫星植被等资料,揭示了该区域的地表沉降分布规律及其与气候、环境因子之间的联系。

结果表明,研究区内山坡沉降空间差异大,快速沉降区沿河谷分布,并主要聚集在坡度为 20°~40°的阳坡坡面,LOS 向沉降速率可达-68.00 mm/a,阳坡的坡面沉降速率平均为-33.02 mm/a,明显快于阴坡的-9.33 mm/a。结合气候、环境等因子,进一步揭示了研究区地表沉降坡向分异规律的环境机制,即太阳辐射的坡向差异引起的生态水文和人为干扰有所不同,导致不同坡向的地表稳定性迥异,主要环境机制包括:①阳坡水分条件胁迫较强,林灌植被覆盖差,不利于地表稳定;②地形雨来向多为偏南方向,使得阳坡受侵蚀较为强烈;③阳坡光热条件好,受垦殖等人类活动影响更大。

本研究针对岷江上游峡谷地区的地表沉降监测结果,有效揭示了区域地表形变特征及诱发因子,可以为川西地区地质灾害隐患点排查、重点灾害体监测预警、灾后应急响应等提供可靠地表形变资料,对于在地质环境脆弱区合理规划人类活动等

具有指导意义。

致谢:感谢中国地震局GNSS数据产品服务平台(<http://www.cgps.ac.cn>)提供数据支撑!

参考文献(References):

- [1] ZHU Aiyu, ZHANG Dongning, ZHU Tao, *et al.* Influence of mantle convection to the crustal movement pattern in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau based on numerical simulation[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2019, 49(2): 353-367.[祝爱玉, 张东宁, 朱涛, 等. 地幔对流拖曳力影响青藏高原东北缘地壳运动格局的数值模拟研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(2): 353-367.]
- [2] JIN Jijun, GUO Changbao, SHEN Yaqi, *et al.* Development characteristics and deformation monitoring analysis of the Zhou-changping landslide in Maoxian County, Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 103-113.[金继军, 郭长宝, 沈亚麒, 等. 四川茂县周场坪滑坡发育特征与变形监测分析[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 103-113.]
- [3] CHI Weikang, LI Xiangxin, LI Pengfei. Reservoir slope deformation monitoring based on GPS[J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 2018, 29(1): 9-12.[叱伟康, 李向新, 李鹏飞. 基于GPS的山区水库边坡滑坡体变形监测[J]. *地质灾害与环境保护*, 2018, 29(1): 9-12.]
- [4] YU Jiansheng, ZHAO Bin, TAN Kai, *et al.* Analysis of GNSS postseismic deformation of Wenchuan Earthquake[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1196-1206.[余建胜, 赵斌, 谭凯, 等. 汶川地震震后GNSS形变分析[J]. *测绘学报*, 2018, 47(9): 1196-1206.]
- [5] LIU Guoxiang, CHEN Qiang, LUO Xiaojun, *et al.* InSAR Principle and Application[M]. Beijing: Science Press, 2019.[刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. *InSAR原理与应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [6] MASSONNET D, FEIGL K, ROSSI M, *et al.* Radar interferometric mapping of deformation in the year after the landers earthquake[J]. *Nature*, 1994, 369(6477): 227-230.
- [7] BERARDINO P, COSTANTINI M, FRANCESCHETTI G, *et al.* Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy)[J]. *Engineering Geology*, 2003, 68(1): 31-51.
- [8] ZHANG Wei, YANG Siqun, WANG Lei, *et al.* Review on disaster reduction application potentiality of synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(6): 904-911.[张薇, 杨思全, 王磊, 等. 合成孔径雷达数据减灾应用潜力研究综述[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(6): 904-911.]
- [9] WEI Congmin, GE Weipeng, SHAO Yanxiu, *et al.* Surface deformation field of eastern Gansu Province by PS-InSAR technique with Sentinel-1A[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 864-872.[魏聪敏, 葛伟鹏, 邵延秀, 等. 利用Sentinel-1A合成孔径雷达干涉时间序列监测陇东地区地面沉降变形[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(4): 864-872.]
- [10] ZHANG Shijia, JIANG Jianjun, MIAO Yamin, *et al.* Application of the SBAS technique in potential landslide identification in the Minjiang Watershed[J]. *Mountain Research*, 2018, 36(1): 91-97.[张诗茄, 蒋建军, 缪亚敏, 等. 基于SBAS技术的岷江流域潜在滑坡识别[J]. *山地学报*, 2018, 36(1): 91-97.]
- [11] MASSONNET D, FEIGL K L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface[J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36(4): 441-500.
- [12] ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717-1733.[朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1717-1733.]
- [13] FRUNEAU B, ACHACHE J, DELACOURT C. Observation and modelling of the saint-tienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry[J]. *Tectonophysics*, 1996, 265(3): 181-190.
- [14] 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.
- [15] XU Yahui. Time series ground motion monitoring before 6.24 Maoxian Xinmo landslide with Sentinel SAR data[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.[徐亚会. 利用Sentinel卫星数据探测6.24茂县新磨村滑坡前时序地表运动特征[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.]
- [16] NIE Bingqi. Landslide deformation detection and identification based on InSAR technology—A case of Danba county[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.[聂兵其. 基于InSAR的滑坡形变探测及隐患识别研究——以丹巴县城区为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.]
- [17] WANG Lei. Risk assessment of landslide in Li county based on GIS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.[王磊. 基于GIS的理县滑坡地质灾害风险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.]
- [18] WANG Jun, YU Yan, OU Guoqiang, *et al.* Flash flood risk zoning of areas hit by Wenchuan Earthquake in the upper reach of Minjiang River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(1): 54-60.[王钧, 宇岩, 欧国强, 等. 岷江上游汶川地震重灾区山洪灾害危险分区研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(1): 54-60.]
- [19] WEI Changli, ZHANG Ying, FENG Wenka, *et al.* Analysis of intensity and regularity of geohazards in upper reaches of Minjiang River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(3): 640-650.[魏昌利, 张瑛, 冯文凯, 等. 岷江上游地质灾害发育强度与规律分析[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(3): 640-650.]
- [20] MAO Shuo. Hazard assessment of landslide geological disaster in Xuecheng area based on GIS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.[毛硕. 基于GIS的薛城地区滑坡地质灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.]
- [21] REN Sanshao. Research on the development characteristics and formation mechanism of damming landslides at Alpine Canyon area in the upper reaches of the Minjiang River[D].

- Beijing: China University of Geosciences, 2018. [任三绍. 岷江上游高山峡谷区堵江滑坡发育特征与形成机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.]
- [22] WANG Chaoyang. Study on the relationship between aspect and slope stability[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008. [王朝阳. 坡向与斜坡稳定性的关系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.]
- [23] XIONG Qianying. Based on 1:50 000 geological hazard mapping of regional geological hazards and risk assessment and regionalization—Shigeru to Brunei Qiang Autonomous County as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. [熊倩莹. 基于1:5万地质灾害填图的区域地质灾害易发性及危险性的评价与区划——以茂汶羌族自治县幅为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.]
- [24] ZHENG Jie, FENG Wenlan, WANG Fengjie, *et al.* Spatial definition and its range variation of arid valley in the upper reaches of Minjiang River[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(3): 541-548. [郑杰, 冯文兰, 王凤杰, 等. 岷江上游干旱河谷范围的界定及其变化分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(3): 541-548.]
- [25] MENG Guocai, MA Dongtao, WANG Shige, *et al.* Land environment problems and its driving forces in the upper reaches of the Minjiang River[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(5): 759-765. [孟国才, 马东涛, 王士革, 等. 岷江上游地区环境问题及其驱动力[J]. 干旱区地理, 2007, 30(5): 759-765.]
- [26] ZHANG Shijia. Application of the SBAS technique in landslide identification in the Minjiang Watershed[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017. [张诗茹. 基于SBAS技术的岷江流域滑坡识别方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.]
- [27] KANG Ya, ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, *et al.* Research on the InSAR technique of landslide detection: A case study of Wudongde Hydropower station section, Jinshajiang[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(10): 67-71. [康亚, 赵超英, 张勤, 等. InSAR滑坡探测技术研究: 以金沙江乌东德水电站段为例[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(10): 67-71.]
- [28] HU Bo, WU Yang, WEI Dehong, *et al.* Surface deformation Monitoring after Jiuzhaigou earthquake based on SBAS technology[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2019, 28(3): 30-34. [胡波, 吴洋, 魏德宏, 等. 基于SBAS技术的九寨沟震后地表形变监测[J]. 测绘工程, 2019, 28(3): 30-34.]
- [29] 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. [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.]
- [30] CHEN Shu. Application of Sentinel-1 data in Co-seismic deformation and post-seismic deformation research[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2018. [陈树. Sentinel-1数据在同震形变和震后形变研究中的应用[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2018.]
- [31] SANDWELL D, MELLORS R, TONG X, *et al.* Open radar interferometry software for mapping surface deformation[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2011, 92(28): 234-234.
- [32] TONG X, SANDWELL D T, SMITH-KONTER B. High-resolution interseismic velocity data along the San andreas fault from GPS and InSAR[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(1): 369-389.
- [33] 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(1): 29-42.
- [34] COLESANTI C, WASOWSKI J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry[J]. Engineering Geology, 2006, 88(3): 173-199.
- [35] WANG Yuwen, JIE Mingshu, Zhang Hongjiang. Effects of forests on slope stability in the Granite Mountainous area of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1997, 19(4): 9-13. [王玉杰, 解明曙, 张洪江. 三峡库区花岗岩山地林木对坡面稳定性影响的研究[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(4): 9-13.]
- [36] LI Kai, SUN Yuedi, JIANG Baohua, *et al.* Analysis on spatial-temporal patterns of the vegetation coverage and landslides in Bailongjiang River basin based on the dimidiate pixel model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2014, 50(3): 376-382. [李凯, 孙悦迪, 江宝骅, 等. 基于像元二分法的白龙江流域植被覆盖度与滑坡时空格局分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 376-382.]
- [37] ZHANG Y, LIU B Y, ZHANG Q C, *et al.* Effect of different vegetation types on soil erosion by water[J]. Acta Botanica Sinica, 2003(10): 1204-1209.
- [38] ZHAO Feng, WANG Yunjia, YAN Shiyong. Analysis of the reliability and subsidence gradient for the subsidence monitoring result of time-series InSAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(5): 969-979. [赵峰, 汪云甲, 闫世勇. 时序InSAR技术地表沉降监测结果可靠性及沉降梯度分析[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 969-979.]
- [39] XIE Shuai. Research on active landslide monitoring technology based on high resolution SAR image[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. [谢帅. 基于高分辨率SAR影像的活动性滑坡监测技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.]
- [40] CHEN Yulong. Monitoring and analyzing displacement of the Daguanbao landslide by multi-temporal InSAR[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. [陈宇龙. 基于时序InSAR的大光包滑坡位移监测与演化态势分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.]
- [41] WANG Dongsheng, LIU Hai. Characteristics analysis and stability study of Taoping landslide in Taoping township of Li County[J]. Public Communication of Science & Technology, 2011, 3(4): 119-120. [王东升, 刘海. 理县桃坪乡桃坪滑坡特征

- 分析及稳定性研究[J].科技传播,2011,3(4):119-120.]
- [42] HERRERA G, GUTIERREZ F, GARCIA A-DAVALILLO J C, *et al.* Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees)[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 128(6): 31-43.
- [43] WANG Zhanwei. Research on landslide identification method of Datong County in Qinghai based on SBAS-InSAR technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. [王战卫. 基于SBAS-InSAR技术的青海大通县滑坡识别方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.]
- [44] LING Bing, YU Min. Sensitivity factors of slope gradient and slope direction of landslides in Daguan County, Yunnan[J]. Urban Geology, 2015, 10(3): 68-70. [凌炳, 余敏. 滑坡灾害坡度坡向敏感性分析研究: 以云南大关县为例[J]. 城市地质, 2015, 10(3): 68-70.]
- [45] DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, GAO Jinchuan, *et al.* Landslide susceptibility assessment based on GIS in Bailongjiang Watershed, Gansu Province[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1): 1-11. [杜国梁, 张永双, 高金川, 等. 基于GIS的白龙江流域甘肃段滑坡易发性评价[J]. 地质力学学报, 2016, 22(1): 1-11.]
- [46] ZHANG Yinguang, CHEN Jiwei, XU Yujiang. Classification and utilization of agricultural climatic resources in arid valleys in Southwest China[J]. Resources Science, 1989, 11(3): 1-6. [张谊光, 陈纪卫, 徐渝江. 我国西南干旱河谷农业气候资源的分类与合理利用[J]. 资源科学, 1989, 11(3): 1-6.]
- [47] WEN Hao. Study on landslide recognition in Minjiang basin based on MTI technology [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015. [温浩. 基于MTI技术的岷江流域滑坡识别研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.]
- [48] ZHU Dantong. Study on the evaluation of landslide susceptibility based on the surface deformation points—Examples from the Minjiang River Basin [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2016. [朱丹桐. 基于地表形变点的滑坡易发性评价研究——以岷江流域为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.]
- [49] ZHONG Ning. Earthquake and provenance analysis of the lacustrine sediments in the upper reaches of the Min River during the late pleistocene [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2017. [钟宁. 岷江上游晚更新世湖相沉积的古地震及物源分析[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2017.]

Controls Underlying the Aspect Pattern of SBAS-InSAR Retrieved Surface Subsidence in the Upper Minjiang Basin

XIAO Hongmin¹, ZHANG Wenjiang¹, TIAN Yunfeng², JIANG Huiru¹, ZHU Qiang³

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. National Institute of Natural Hazards Prevention, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China;

3. Information Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The Upper Minjiang Basin, in the eastern Tibetan Plateau, is characterized by complex rugged terrains, so it was vulnerably subjected to surface subsidence related hazards. Therefore, it was quite beneficial and necessary to explore the controls underlying subsidence for disaster mitigation and avoidance. In the study, totally 60 Sentinel-1A images were chosen to detect possible surface subsidence from 2015 to 2019 with the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) method in the study area, and then the factors underlying the subsidence were discussed. The results showed that south (sunny) slopes experienced the higher subsidence rate (averagely -33.02 mm/a) than the north (-9.33 mm/a) though with similar elevation and slope degree. The spatial patterns of subsidence could be attributed the terrain aspect related factors. The sparse vegetation cover on sunny slopes due to severer water deficit provided the weak protection to surface stability, and the physical erosion induced by the northward orographic rain was also not beneficial to the stability of south slopes. In addition, sunny slopes abundant in solar energy were subjected to more human activities such as farming and building, which also could weaken surface stability. Our study emphasized the distinct vulnerability in surface stability of south slopes in this region, which should be carefully taken into account in land developing as so to avoid causing landslides.

Key words: Surface subsidence; InSAR; Aspect variation; Water/heat conditions; Upper Minjiang Basin