

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0685-10

三峡库区山区城镇重大地质灾害 监测预警示范研究

冯 振^{1,2}, 李 滨^{1,2}, 赵超英³, 王 利³, 王 磊⁴

(1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 长安大学, 西安 710064;

4. 防灾科技学院, 河北 燕郊 101601)

摘要: 以三峡库区羊角场镇为例, 在地质调查基础上, 利用伸缩位移计、应力计等常规地面监测设备, 对地表裂缝相对位移和危岩体基座应力进行监测, 并结合 GPS 静态和实时动态测量等技术, 开展了角反射器干涉测量技术 (CR-InSAR) 和高相干 InSAR 技术在复杂山区地质灾害大范围调查与识别应用, 从点到面、从大型危岩体到区域地表形变全覆盖。各种方法监测结果较为一致, 有效实现了典型山区城镇地质灾害变形的高精度、动态立体化监测。

关键词: 山区城镇; 地质灾害监测; 危岩; InSAR

中图分类号: P642.2; P694

文献标识码: A

0 引言

长江三峡地区位于中国地形第二级阶梯和第三级阶梯的过渡带, 以大巴山脉和巫山山脉为骨架, 形成以中山、低山和峡谷为主的侵蚀地貌景观, 地质条件复杂。随着全球气候极端异常, 三峡库区城镇化快速发展, 工程活动明显加剧, 人口无序激增, 已经影响到地质环境容量和已有的地质稳定性^[1~2]。因此, 亟待提高三峡库区城镇地质灾害监测预警的自动化、标准化和远程化水平, 加强地质灾害风险管理^[3]。

本文选择的三峡库区羊角场镇是地质灾害高发区, 历史上发生过多次崩塌灾害。目前羊角场镇区域内主要发育大型危岩和滑坡两种灾害类型, 对场镇内居民生命财产造成巨大威胁。羊角属于典型的由上部二叠系灰岩和下部志留系页岩组成的“上硬下软、上陡下缓”二元结构地貌形态。这一地貌在中国重庆、湖北、贵州、云南、四川等西南灰岩山区有广泛的分布, 加之地形复杂、植被茂盛, 气候多雨多雾, 引起过多起重大崩塌、滑坡灾害, 传统的地质灾害监测预警技术实施范围非常有限, 难以发现潜在滑坡危岩体灾害^[4~6]。

针对这一难点, 本文在地质灾害详细调查基础上, 结合近年发展起来的空天地测量技

收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41302246, 41472295); 中国地质调查局地质调查项目 (12120114079101, DD20160268)

作者简介: 冯振 (1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地质灾害等方面的研究工作。E-mail: fengzhencgs@126.com

术(如 InSAR 技术、GPS 远程实时监测技术等),开展了羊角场镇区域地表形变的 CR-InSAR 调查与监测,结合雨量、裂缝位移计、GPS 动静态等地表监测方法,实现了典型大型高陡山体变形的高精度、动态立体化监测,可为山区城镇地质灾害监测方法与网络建设提供参考。

1 羊角场镇地质灾害发育特征

重庆市武隆县羊角场镇位于乌江下游左岸,为强侵蚀岩溶化中低山峡谷区,构造上位于羊角背斜西翼近核部^[7-8]。羊角场镇整体地势东南高、西北低,最高点位于后山山坡尖顶,高程 1376 m,最低点位于前缘乌江岸边,高程 160 m。后山陡崖总体走向 SE150°—165°,呈带状延伸约 5.1 km,整体地貌形态如图 1 所示。场镇后山陡崖主要由二叠系灰岩组成,灰岩中夹有 3 组软弱岩层,分别为:吴家坪组底部页岩、煤层和泥岩软层,厚约 12 m;栖霞组顶部泥质微晶灰岩与泥质条带互层,厚 4~10 m;梁山组含铝土矿和煤线的黏土岩、页岩,厚约 11 m。以吴家坪组底部软弱层形成的缓坡为界线,陡崖大致分为 2 级,一级陡崖由二叠系吴家坪组灰岩构成,二级陡崖主要由二叠系茅口组、栖霞组岩层组成。陡崖带采矿活动极为活跃,分布有 3 个矿区,还有大量无序开采的小煤窑,开采历史达数百年,目前均已关闭。开采矿层主要为吴家坪组底部煤层和梁山组顶部硫铁矿及煤层,形成大量采空区,加速了地表的沉降与岩体开裂。陡崖下部为志留系韩家店组页岩,表层覆盖大面积崩滑堆积体,地形较平缓,坡度在 10°—30°之间,羊角场镇即坐落于松散堆积体上。



图 1 重庆武隆县羊角场镇地貌与地质灾害分布(镜像南)

Fig. 1 Distribution of geological hazards in Yangjiaochang area

羊角场镇区域内主要发育大型危岩和滑坡两种灾害类型,后山陡崖带分布有大型危岩体 11 处(见图 1、表 1),陡崖下方为 2 处大型堆积层滑坡(见图 1)。

羊角场镇滑坡群由秦家院子滑坡和羊角滑坡 2 个大型滑坡组成,2 个滑坡的坡体结构和组成物质基本相同,均为由二叠系灰岩崩坡积物及志留系表层强风化砂页岩残坡积物形成的堆积层滑坡,沿堆积体与基岩接触面滑动;滑床为志留系韩家店组页岩、粉砂质页岩,主滑方向 14°。此 2 处滑坡近期无明显的整体变形破坏迹象,仅在雨季出现小规模浅表变形。滑坡前缘延伸至乌江,属于规划建设白马电站回水区,未来在库水波动及江水淘蚀作用下滑

表1 羊角场镇大型危岩体特征表

Table 1 Characteristics of large-scale perilous rock masses in Yangjiao area

危岩名称	岩性	滑坡形态	破坏模式
大巷危岩	二叠系吴家坪组灰岩	长条形	视向滑动式
庆峰危岩 I		长条形	视向滑动式
庆峰危岩 II		柱状	滑塌式
庆口危岩		长条形	视向滑动式
小湾后危岩		柱状	滑塌式
大湾后危岩		柱状	倾倒式
观音洞危岩		不规则形	落石破坏式
小湾危岩	二叠系茅口组灰岩	柱状	滑塌式
大湾危岩		柱状	滑塌式
大湾北危岩		锥状	滑塌式
观音洞北危岩		柱状	滑塌式

坡可能加剧变形复活。

羊角场镇后山陡崖带长约 5 km, 危岩体变形破坏由来已久。1985—1986 年在大湾危岩顶部发现 234 m 长的地表裂缝, 同时伴随小规模崩塌; 1993 年在大湾危岩西侧发生崩塌, 方量约数千方; 至 2002 年, 庆口危岩顶部裂缝最大宽度约 3.5 m, 裂缝长度 496 m; 2013 年, 庆峰和庆口危岩东侧均发生数千方的崩塌。根据危岩体几何形态、主控结构面特征和变形破坏迹象, 羊角后山大型危岩体主要破坏类型可以分为斜倾滑移式、滑塌式、倾倒式和落石破坏式 4 种。近年来, 大巷、庆口、大湾、小湾和观音洞陡崖位置时常发生小规模崩塌灾害, 表明目前羊角后山危岩带在自然环境与采空区影响下, 仍处于变形阶段, 需要加强监测。

2 地质灾害监测方法与网络布置

由于地质灾害的存在, 严重影响羊角镇的规划建设, 致使该镇至今无小城镇规划, 而场镇搬迁还是原址发展仍然在不断地论证中。为此, 开展地质灾害监测、建立地质灾害监测系统, 对于保障城镇安全与规划具有重要参考价值。

羊角场镇地区地形复杂, 山高崖陡, 最大高差超过 1200 m, 且植被茂密, 气候多雨多云, 对地质灾害监测方法、数据采集和传输要求较高。本文在详细地面调查和分析的基础上, 综合采用常规地表监测方法、高精度动静态 GPS 遥感技术和 InSAR 技术等, 对羊角场镇地质灾害开展危岩体和滑坡联合监测。监测数据实时传输, 实现了典型危岩体和滑坡体变形情况的全天候自动化实时动态监测, 进而可对危岩体变形趋势进行判断。通过远程登陆多参数采集服务系统, 可以实时查看和下载监测数据进行分析。

羊角场镇地质灾害常规地表监测主要采用伸缩位移计和应力计。为了监测裂缝的张开变化情况, 在庆口危岩西侧裂缝安装了 1 个三向伸缩位移计 (3DWY)。3 个应力监测点 (YL01、YL02 和 YL03) 布置在庆口危岩底部基座, 以监测岩体垂向应力变化情况。

GPS 技术具有很高平面精度, 选点灵活, 是地质灾害地表绝对位移监测的常用方法^[9]。羊角场镇地形复杂、交通不便, 植被茂密、通视困难, 因此灾害监测以高精度静态 GPS 相对定位技术为主, 结合 GPS 实时动态监测方法, 既能高精度实时连续监测危岩体的地表变形, 又能及时准确预警。羊角场镇地质灾害监测网共有 11 个 GPS 监测点 (见图 2), 分别设

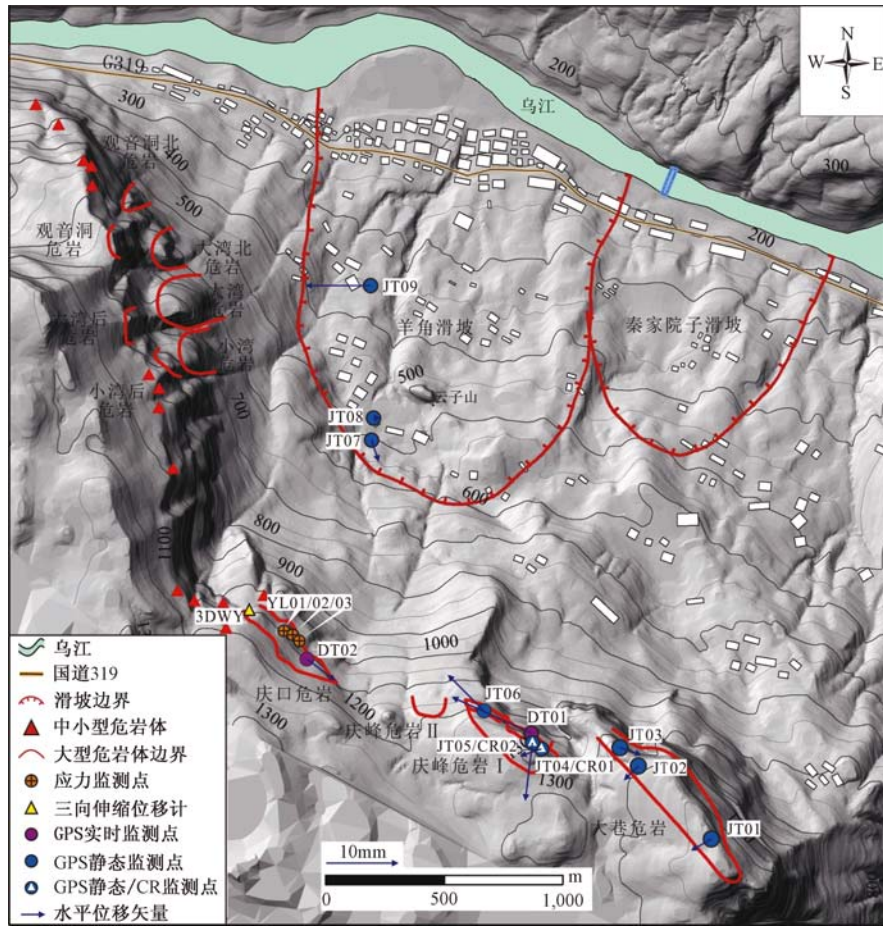


图2 羊角场镇地质灾害监测点布置图 (水平位移为静态GPS监测结果)

Fig. 2 Lay-out of geohazards monitoring devices in Yangjiao area

置在大巷危岩 (JT01—JT03)、庆峰危岩 (JT04—JT 06 和 DT01)、庆口危岩 (DT02)、羊角滑坡 (JT07—JT09), 其中含 2 个实时动态监测点 (DT01 和 DT02)。

为了全面掌握区域地质灾害变形情况, 实现监测外地质灾害的识别与探测, 在羊角场镇开展了高空间分辨率 InSAR 监测。InSAR 技术通过对一定周期内的重访 SAR 影像数据进行处理, 可实现大范围地表变化信息的探测^[10]。InSAR 技术的地表形变监测精度可达毫米级, 通过大量 SAR 影像的时间序列相位形变信息的分析, 能够有效实现不稳定块体的识别和探测。地表植被、雨雾变化等会引起时间和空间失相干, 对 InSAR 监测精度和结果造成影响, 而 CR-InSAR 技术特别适合于植被茂密等监测低相干区域的地表形变^[11]。因此, 在重点监测的危岩体上加设人工角反射器 (CR), 利用角反射器干涉测量技术 (CR-InSAR) 对危岩体进行监测, 利用卫星捕获其稳定的相位值再通过一系列数据处理提取目标形变信息。2 个 CR-InSAR 监测点 (CR01 和 CR02) 均布设在庆峰危岩体顶部, 与 2 个 GPS 静态监测点 (JT04 和 JT05) 位置相同。

3 地表监测结果分析

3.1 常规地表监测结果

3DWY 传感器组合构成三向伸缩位移计, 安装在庆口危岩东部前缘孤立危岩体与山体之间, 01 号监测方向为 330°, 02 号监测方向为 240°, 03 号监测方向垂直向下 (见图 3)。2013 年 10 月至 2016 年 5 月期间 3 个伸缩位移传感器读数变化曲线 (见图 4) 显示, 1 号、2 号传感器位移曲线平直, 3 号传感器自 2014 年 5 月开始持续减小, 由 0.35 m 降至 2014 年 10 月的 0.01 m, 之后保持小幅波动, 趋势稳定。伸缩位移计的监测结果说明, 危岩体水平变形不明显, 主要以垂直方向的沉降变形为主。



图 3 重庆羊角庆口危岩三向伸缩位移监测

Fig. 3 The three dimensional displacement monitoring devices installed in Yangjiao area

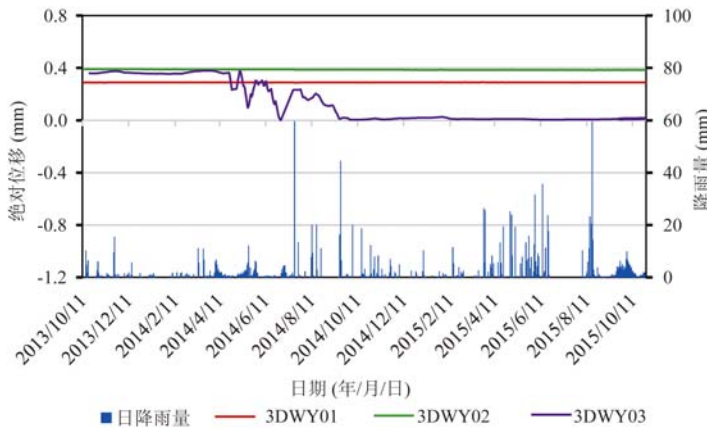


图 4 重庆武隆羊角危岩带裂缝位移监测曲线

Fig. 4 Time series of relative displacement of ground cracks in Yangjiao area

羊角危岩带的危岩体主要沿厚层灰岩中夹软弱夹层发生破坏, 因此需将压力传感器安装在软弱夹层内 (见图 5), 以监测上部危岩体通过变形传递至软弱夹层的垂直应力变化。压力盒安装首先将软弱夹层岩体掏空, 地表垫平, 将压力盒水平安放, 然后用水泥砂浆进行填充。羊角危岩带岩体应力监测曲线 (见图 6) 显示, 2014 年 1 月至 2015 年 8 月间, 3 个应力计的监测数据变化不大。YL01 传感器应力变化范围为 0.47 ~ 0.64 MPa, YL02 传感器应力变化范围为 0.56 ~ 0.72 MPa, YL03 传感器应力变化范围为 0.32 ~ 0.36 MPa, 这是由危岩体受降水、温度等外界影响下的微小变形引起的, 危岩体整体处于基本稳定状态。2015 年 8

月下旬, 3 道传感器应力均出现短暂的剧变, 测得应力值最大超过 60 MPa。对应的该段时间内, 出现了集中和连续降雨事件, 降雨引起危岩体的变形及内部应力调整。2015 年 9 月以后, 3 道传感器应力监测值较之前变小, 但呈小幅度不断变化, 整体趋势稳定, 岩体处于基本稳定状态。



图 5 压力盒安装位置

Fig. 5 Location of stress monitoring devices

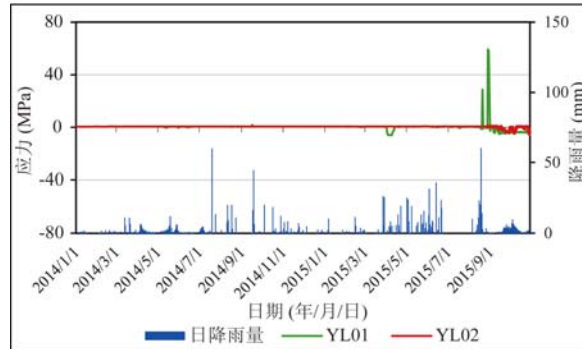


图 6 重庆武隆羊角危岩带岩体应力监测曲线

Fig. 6 Time series of stress in perilous rock base in Yangjiao area

3.2 GPS 和 CR-InSAR 监测结果

除 JT07—JY09 位于羊角滑坡体上, 其他遥感监测点均位于大型危岩体顶部, 所处环境植被茂密, 主要采用静态 GPS 测量, 局部利用实时动态 GPS 及角反射器干涉测量方法相互校核检验。GPS 静态观测按照国家 GPS 测量规范中 B 级网的精度, 采用定期巡测方式获得各监测点的形变信息, 各 GPS 监测点的点位中误差优于 ± 5 mm。实时监测设备可以对危岩体进行连续实时监测, 并每隔 3 个小时获取监测点的变形信息, 解算结果在平面方向上的精度优于 ± 5 mm, 高程方向上的精度优于 ± 10 mm。CR-InSAR 采用 2012—2016 年的 16 景 TerraSAR 影像, 选择短基线组合进行解算, 利用 GPS 测量的高程数据来去除地形相位的影响, 构建 Delaunay 三角网获取双差相位减弱大气延迟的影响, 参考基准点采用最小费流法空间相位解缠, 最终获取 CR 点视线向形变结果。GPS 及 CR-InSAR 监测点的监测结果见表 2。

JT01、JT02 和 JT03 位于大巷危岩体后部、中部和前缘, 水平方向上位移较小, 位移量分别为 7 mm、2.8 mm、3.2 mm, 位移方向分别向南、西南、东南, 未显示明显的变形规律。

JT04—JT06 以及 DT01 位于庆峰危岩顶部, 4 个点的静态监测水平位移量为 3.2 ~ 12.1 mm。靠近西北侧陡崖的 JT06 和 DT01 点, 向西北方向变形, 远离临空面的 JT04 和 JT05 则向西南方向, 即倾向方向变形。CR01 和 CR02 位置分别与 JT04 和 JT05 相同, 采用角反射器干涉测量, 测量结果与静态监测结果趋势一致, 水平上向西南运动, 并呈现垂直下沉。DT01 点同时采用实时动态 (见图 7) 和静态监测方法, 两种监测方法结果较为吻合 (见表 2), 测得的水平和垂直位移量差别不大, 分别为 12.1 mm、-5.0 mm 和 7.8 mm、-12.2 mm, 显示的变形方向基本一致, 均向西偏北运动。

DT02 位于庆口危岩东侧, 亦采用实时动态 (见图 8) 和静态两种方法进行监测。水平上两种监测方法结果较一致, 向东南方向偏移约 5 mm。

JT07 和 JT08 位于羊角滑坡后缘偏西侧, GPS 静态监测水平位移量较小。JT07 向东南变形 3.2 mm, JT08 向东位移 1.0 mm。JT09 位于羊角滑坡中部偏西, 水平位移量相对较大,

表2 羊角场镇的地质灾害遥感监测结果 (单位: mm)

Table 2 Monitoring results of geohazards via remote sensing methods in Yangjiao area

点号	测量方法	东	北	水平位移量	垂直*	点位	位移方向	监测时间
JT01		-7.0	0.0	7.0	24.0		南	
JT02	静态 GPS	-2.0	-2.0	2.8	10.0	大巷危岩	西南	2014/10—2015/10
JT03		-1.0	3.0	3.2	-1.0		东南	
JT04	静态 GPS	-1.0	-3.0	3.2	-16.0		西南	2012/11—2015/10
CR01	角反射器干涉	-	-	11.0	-4.0		西南	2012/06—2014/01
JT05	静态 GPS	-8.0	-1.0	8.1	-16.0		西南	2012/11—2015/10
CR02	角反射器干涉	-	-	21.0	-8.0	庆峰危岩	西南	2012/06—2014/01
DT01	静态 GPS	5.0	-11.0	12.1	-5.0		西北	2013/10—2015/09
	动态 GPS	4.5	-6.4	7.8	-12.2		西北	
JT06	静态 GPS	5.0	-5.0	7.1	-29.0		西北	2013/10—2015/10
DT02	静态 GPS	-3.0	4.0	5.0	-36.0	庆口危岩	东南	2013/10—2015/07
	动态 GPS	-1.4	5.2	5.4	4.6		东南	
JT07		-3.0	1.0	3.2	-59.0		东南	
JT08	静态 GPS	0.0	1.0	1.0	-56.0	羊角滑坡	东	2013/10—2015/10
JT09		0.0	-9.0	9.0	-51.0		西	

*: 位移方向垂直向下为负, 向上为正

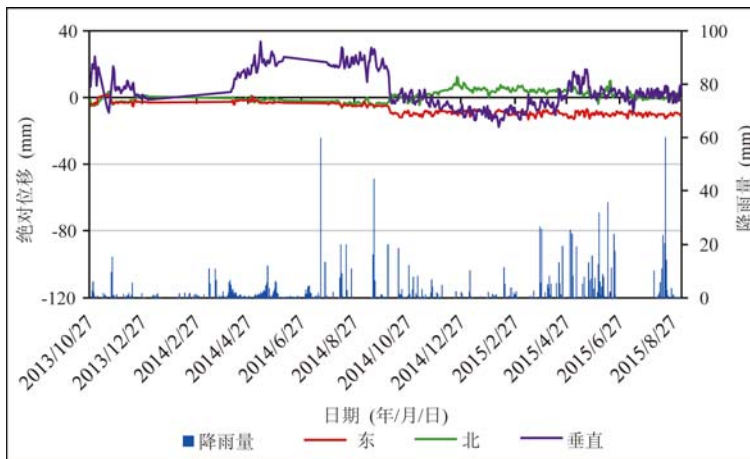


图7 DT01 实时动态 GPS 监测时间曲线

Fig. 7 Time series of deformation in DT01 station by real-time GPS monitoring

向西偏移 9 mm。3 个监测点均表现为垂直下沉, 且沉降量均超过 50 mm。

4 区域地表形变 InSAR 监测

区域地表形变 InSAR 监测同样采用 TerraSAR 数据, 而利用短波长、高空间分辨率的 TerraSAR 进行滑坡危岩体监测的难点在于时间失相干和地形相位误差的影响^[12]。为了控制地形误差的影响, 处理中选择垂直基线小于 50 m 的干涉对进行解算, 使外部 DEM 误差引起的 InSAR 视线向误差小于 5 mm。在优先考虑地形误差影响的情况下, 为克服失相干对干涉相位质量的影响, 选择干涉图中相干性大于 0.7 的点进行处理。采用高相干点 InSAR 方法获取的羊角镇滑坡危岩体形变速率如图 9 所示。值得说明的是, 受制于时间失相干的影响, 短波长的 TerraSAR 数据用于形变监测的相干点非常少。

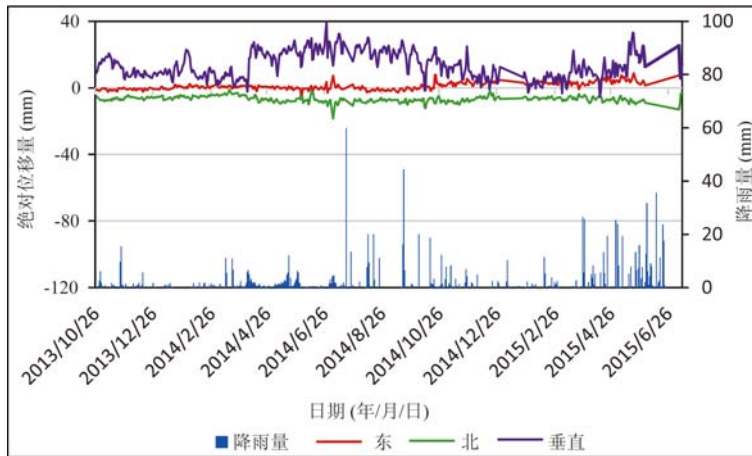


图8 DT02 实时动态 GPS 监测时间曲线

Fig. 8 Time series of deformation in DT02 station by real-time GPS monitoring

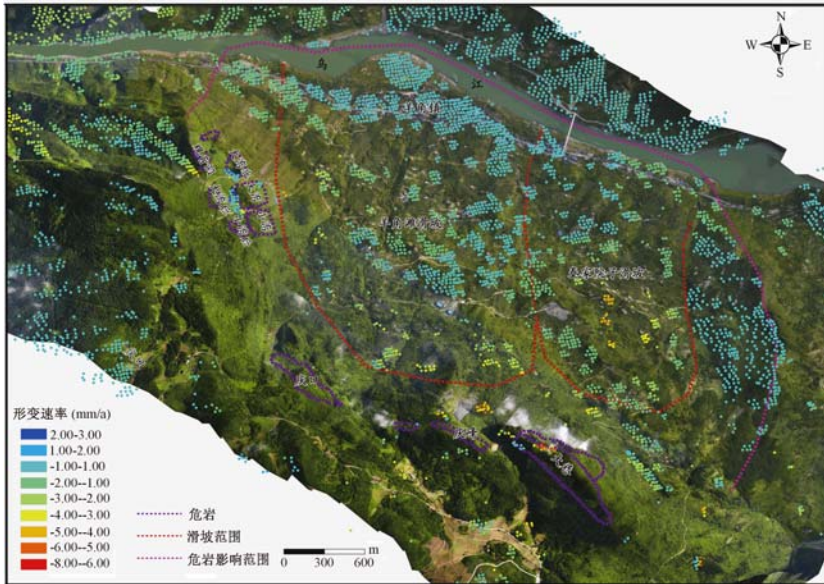


图9 羊角场镇区域地表形变平均速率 (2012年6月—2014年1月)

Fig. 9 Average ground deform velocity of Yangjiao area (June 2012 - January 2014)

从有效的观测点分析, 2012—2014 年间, 羊角区域 InSAR 视线向年平均形变速率变化范围为 $-6 \sim 6$ mm/a。除去部分零散的形变点之外, 较为明显且集中分布的形变区主要位于陡崖下方至乌江沿岸的滑坡区域。羊角场镇位于三峡库区回水区, 库水升降及河流淘蚀对羊角滑坡前缘影响较大, 加上人类工程活动较为集中, 因此变形显著。场镇后山危岩体形变, 除去庆峰危岩下方少许形变信息外, 其他危岩均无可用形变点。

5 结论

武隆县羊角镇是遭受滑坡、危岩体灾害严重的区域之一, 对当地的经济发展和规划建设造成了严重影响。羊角场镇具有典型西南山区城镇的地形地貌特点, 山高、林密、崖陡且地

质灾害体多为危岩体,常规地质灾害监测技术难以实现。因此,利用伸缩位移计、应力计等常规地面监测设备,对地表裂缝相对位移和危岩体基座应力进行监测,并结合GPS静态和实时动态测量、角反射器干涉测量等技术,从点到面、从大型危岩体到区域地表形变全覆盖,建立了羊角场镇地面与遥感相结合的地质灾害监测网。

地表裂缝三向伸缩位移计监测结果显示,庆口危岩东侧危岩体水平变形不明显,主要表现为整体下沉。2014年5月至2014年10月沉降约30mm,之后保持小幅波动,趋势稳定。2014年1月至2015年8月间,受降水、温度等外界影响下,位于庆口危岩东侧底部的应力监测数据小范围波动。2015年8月下旬,集中和连续降雨事件引起危岩体的变形及内部应力调整,监测应力出现短暂的剧变。此后,三道传感器应力监测值较之前变小,但呈小幅度不断变化,整体趋势稳定,岩体处于基本稳定状态。

从GPS静态监测的结果来看,大巷危岩体顶部JT01—JT03测得位移量较小,且未显示明显的变形规律。庆峰危岩体东南侧的JT04和JT05向西南偏移,西北前缘的JT06和DT01则向西北临空方向运动,与GPS动态监测以及CR监测结果一致,显示庆峰危岩后部顺层变形、前缘视向临空变形的趋势。位于庆口危岩顶部的DT02,静态和实时动态监测显示水平上向东南方向移动。JT07—JT09位于羊角滑坡体,GPS静态监测结果显示水平位移较小,主要表现为垂直下沉,沉降量均超过50mm。

高相干点InSAR技术对羊角滑坡进行了整体监测,其结果表明除去庆峰危岩下方微小形变信息外,其他危岩均无明显形变点,较为明显的形变区主要且集中分布在羊角滑坡前缘、乌江沿岸,与GPS监测结果较为一致。

参 考 文 献

- [1] 殷跃平. 三峡工程库区移民迁建区地质灾害与防治 [J]. 地质通报, 2002, 2 (12): 876~880.
YIN Yue-ping. Geohazards and their prevention in resettlement areas of emigrants from the reservoir region of the Three Gorges Project [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (12): 876~880.
- [2] 殷跃平. 加强城镇化进程中的地灾防治工作 [N]. 中国国土资源报, 2014-04-21 (4).
YIN Yue-ping. Enhance geological hazards mitigation in urbanization process [N]. China Land and Resource News, 2014-04-21 (04).
- [3] 刘传正. 重庆武隆羊角镇工程地质环境初步研究 [J]. 水文地质工程地质学报, 2013, 40 (2): 1~8.
LIU Chuang-zhen. Primary research on the geological environment around Yangjiao Twon in Wulong County, Chongqing, China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40 (2): 1~8.
- [4] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究 [J]. 地球科学进展, 2004, 19 (3): 443~450.
HUANG Run-qiu. Mechanism of large scale landslides in western China [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19 (3): 443~450.
- [5] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (4): 445~454.
YIN Yue-ping, ZHU Ji-liang, YANG Sheng-yuan. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris floe at Dazhai in Guizhou Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (4): 445~454.
- [6] 殷跃平, 刘传正, 陈红旗, 等. 2013年1月11日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究 [J]. 工程地质学报, 2013, 21 (1): 6~15.
YIN Yue-ping, LIU Chuan-zheng, CHEN Hong-qi, et al. Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhaojiagou, Zhenxiang County, Yunnan Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21 (1): 6~15.
- [7] 刘传正, 杨冰. 三峡库区地质灾害调查评价与监测预警新思维 [J]. 工程地质学报, 2001, 9 (2): 121~126.
LIU Chuang-zhen, YANG Bing. 2001. A new method of surveying, evaluating, monitoring and forecasting for the geological

- hazards in the Three Gorges on Changjiang River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9 (2): 121 ~ 126.
- [8] 王磊, 李滨, 冯振, 等. 武隆县羊角场镇厚层灰岩山体大型危岩体破坏模式及成因机制研究 [J]. *地质学报*, 2015, 89 (2): 461 ~ 471.
- WANG Lei, LI Bin, FENG Zhen, et al. The failure patterns and their formation mechanisms of large perilous rocks in thick layered limestone masses in Yangjiao Town, Wulong [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89 (2): 461 ~ 471.
- [9] 张勤. GPS 监测滑坡形变的基准研究 [J]. *西安工程学院学报*, 2001, 23 (4): 69 ~ 71.
- ZHANG Qin. The datum research of the slope deformation monitor by GPS [J]. *Journal of Xi' an Engineering University*, 2001, 23 (4): 69 ~ 71.
- [10] 朱建军, 邢学敏, 胡俊, 等. 利用 InSAR 技术监测矿区地表形变 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21 (10): 2564 ~ 2576.
- ZHU Jian-jun, XING Xue-ming, HU Jun, et al. Monitoring of ground surface deformation in mining area with InSAR technique [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21 (10): 2564 ~ 2576.
- [11] 邢学敏, 朱建军, 汪长城, 等. 一种新的 CR 点目标识别方法及其在公路形变监测中的应用 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36 (6): 699 ~ 703.
- XING Xue-ming, ZHU Jian-jun, WANG Chang-cheng, et al. A new method for CR point identification and it' s application to highway deformation monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36 (6): 699 ~ 703.
- [12] 许文斌, 李志伟, 丁晓利, 等. 利用 InSAR 短基线技术估计洛杉矶地区的地表时序形变和含水参数 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55 (2): 452 ~ 461.
- XU Wen-bin, LI Zhi-wei, DING Xiao-li, et al. Application of small baseline subsets D-InSAR technology to estimate the time series land deformation and aquifer storage coefficients of Los Angeles area [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2012, 55 (2): 452 ~ 461.

GEOLOGICAL HAZARDS MONITORING AND APPLICATION IN MOUNTAINOUS TOWN OF THREE GORGES RESERVOIR

FENG Zhen^{1,2}, LI Bin^{1,2}, ZHAO Chao-ying³, WANG Li³, WANG Lei⁴

(1. Key laboratory of Noetectonic Movement and Geological Hazards, Ministry of Land Resource of PRC, Beijing, 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. Chang' an University, Xi' an, Shaan' xi 710064, China;

4. Institute of Disaster Prevention, Yanjiao, Hebei 101601, China)

Abstract: Regular geological hazards monitoring is very difficult in southwestern mountainous area, due to steep terrain, abundant plants, rainy and foggy weather. On the basis of geological hazards survey, a comprehensive monitoring network has been established. Regular geo-hazards monitoring devices, such as telescopic displacement meters and stressometers, are installed to monitor relative displacement of ground cracks and stress in base of perilous rock respectively. Static and real-time GPS, as well as corner reflector interferometry (CR-InSAR), are applied to monitor ground movement of perilous rocks. In order to obtain regional deformation, high coherence InSAR is adopted to investigate and detect geo-hazards. The Yangjiao monitoring network achieves high-resolution and real-time monitoring, and the methods applied are essentially in agreement with movement results.

Key words: mountainous town; geological hazards monitoring; perilous rock; InSAR