

【水利水电工程】

时序 InSAR 水库形变监测应用研究

路聚峰¹ 何智勇¹ 郭庆华¹ 付 姣¹ 刘珂宇² 张 倩² 李涵曼³

(1. 航天宏图信息技术股份有限公司 北京 100089;

2. 河南省河口村水库管理局 河南 济源 454650; 3. 南京水利科学研究所 江苏 南京 210029)

摘 要: 河口村水库作为黄河下游防洪工程体系的重要组成部分,准确快速地获取水库时空形变具有重要的意义。合成孔径雷达干涉测量具有高精度、大范围、时空连续性等优势,为水库形变监测提出了一种新方法。选取覆盖河口村水库 2020 年 1 月 15 日—2020 年 12 月 4 日的 24 景 Sentinel-1A 升轨影像,结合水库环境的特殊性和复杂性,采用适合实际需求的时序 SBAS-InSAR 技术,获取了水库的时序形变信息,并重点研究后坝区形变特性。通过地面 GNSS 监测数据和实地考察,验证了 InSAR 技术对水库监测具有较高的适用性,为后续水库的稳定性评价和黄河下游大堤防洪压力评价提供数据支撑。

关键词: 时序 InSAR; 形变监测; 河口村水库

中图分类号: P237; TV221

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.04.026

引用格式: 路聚峰,何智勇,郭庆华,等.时序 InSAR 水库形变监测应用研究[J].人民黄河,2023,45(4):150-155.

Application Research on Time-Series InSAR Reservoir Deformation Monitoring

LU Jufeng¹, HE Zhiyong¹, GUO Qinghua¹, FU Jiao¹, LIU Keyu², ZHANG Qian², LI Hanman³

(1. Aerospace Hongtu Information Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China;

2. Hekoucun Reservoir Administration of Henan Province, Jiyuan 454650, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Hekoucun Reservoir is an important part of the flood control engineering system in the lower reaches of the Yellow River. Accurate and quick derivation of the deformation field in the reservoir with high temporal and spatial resolution is of great significance. Synthetic aperture radar interferometry has the advantages of high precision, large range, and spatiotemporal continuity, and proposes a new method for reservoir timing monitoring. This paper selected 24 Sentinel-1A orbit-raising images covering Hekoucun Village Reservoir from January 15, 2020 to December 4, 2020, and combined the particularity and complexity of the reservoir environment to develop time series SBAS-InSAR technology suitable for actual needs. The time series deformation information of the reservoir was obtained and the deformation characteristics of the rear dam area were mainly studied. Through ground GNSS monitoring data and field investigation, it was verified that InSAR technology has high applicability for reservoir monitoring, and can provide data support for the stability evaluation of subsequent reservoirs and the flood control pressure evaluation of the levee in the lower reaches of the Yellow River.

Key words: Time-Series InSAR; deformation monitoring; Hekoucun Reservoir

河口村水库坝址位于沁河下游最后一段峡谷的出口处,控制沁河流域总面积的 68.2%,是控制沁河洪水、径流的关键工程,也是黄河下游防洪工程体系的重要组成部分^[1]。河口村水库时序形变是评价其稳定性的关键因素。合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)在工程形变监测中广泛使用。2010 年 Liu 等^[2]基于 InSAR 原理获取了阿拉斯加北坡地表面形变状况;2012 年廖明生等^[3]基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)技术,以 TerraSAR-X 数据为例分析了三峡库区滑坡形变情况;裴媛媛等^[4]根据 SAR 影像提取了上海长江口南岸和杭州湾北侧堤坝的沉降速率;2017 年张艳梅

等^[5]基于哨兵一号(Sentinel-1)数据采用小基线集成孔径雷达干涉测量(Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)技术对西安城区及周边进行地面沉降监测,并利用已有数据进行佐证,得到了西安地表变化特征。2021 年蒲川豪等^[6]利用 SBAS-InSAR 技术对覆盖延安新区的 2016 年 5 月—2019 年 10 月期间的

收稿日期: 2022-09-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3900603)

作者简介: 路聚峰(1987—),男,河北邯郸人,高级工程师,硕士,主要从事 InSAR 地质灾害监测工作

通信作者: 何智勇(1994—),男,四川成都人,工程师,研究方向为合成孔径雷达地表监测技术

E-mail: hezhiyong.yin@foxmail.com

Sentinel-1A 数据进行处理,获取了延安新区地面抬升空间分布规律和形变演化特征,并对成因进行了详细分析。

综上所述,InSAR 技术已经广泛地应用于矿区、山区地表形变监测过程中并取得较好的监测结果。但是面对河口村水库独特的水域环境和复杂的地理环境,时序 InSAR 技术的使用要因因地制宜,根据实际情况来使用具体的监测技术。常用的时序 InSAR 技术包括 PS-InSAR、SBAS-InSAR 等^[7-9]。本文主要采用 SBAS-InSAR 技术对水库进行形变监测,重点研究后坝区形变特性,通过探测后坝体表面高质量的散射体点目标,并采用地面控制点来对干涉相位和解缠相位进行校正,提取较高精度的时序形变信息,再通过地面数据进行验证,探讨形变累积量与地面监测数据之间的相似性。本研究监测水库及周边形变信息,为后续维持水库的稳定性和减轻黄河下游大堤的防洪压力提供数据支撑。

1 时序 InSAR 方法基本原理

小基线集合成孔径雷达干涉测量技术(SBAS-InSAR)由 Berardino 在 2002 年提出。SBAS 技术首先将所有 SAR 数据根据空间基线与时间基线阈值组合成小基线集,使得各子集内 SAR 数据时空基线较短,在每个子集中利用最小二乘法进行计算,对各子集间利用奇异值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)进行处理,最终获取整个时间序列上的形变信息^[9]。SBAS-InSAR 利用具有较短时间、空间基线的干涉对生成差分干涉图,以提高干涉对的相干性。通过对差分干涉图的多视处理降低相位噪声,提取高相干像元。应用奇异值分解法,求得长时间序列的地表形变速率在最小范数意义上的最小二乘解。SVD 方法继承了传统方法的优点,且能获取长时间地表缓慢形变的规律,提高形变监测的时间分辨率。

综合河口村水库的水文流域和独特的地表环境,利用 SBAS-InSAR 技术对河口村坝区进行地表形变研究,在数据预处理、差分干涉处理和差分干涉相位解缠的基础上进行 SBAS-InSAR 形变速率以及形变时间序列解算,从而判断坝体是否产生形变。河口村水库大坝时序 SBAS-InSAR 处理流程如图 1 所示。

1.1 干涉对选取

SBAS-InSAR 技术的形变监测精度随着时空基线的减小而提高,过大的时空基线会增加干涉效果较差干涉对的数量、降低结果精度,且会因数据量过大而降低数据处理效率;过小的时空基线会造成干涉对数量不足,降低基线网络的稳定性,甚至无法形成连续的干

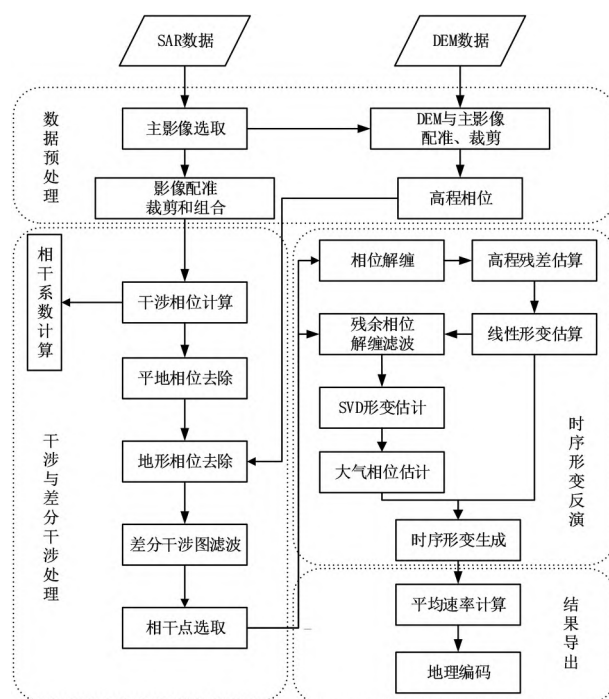


图 1 SBAS-InSAR 处理流程

涉对,降低监测结果的可信度。本研究中,经过多次试验,当设置空间基线为 ± 100 m、时间基线阈值为 60 d 时,基线网络的质量达到最优。相比 PS-InSAR 技术采用单一主影像方法,SBAS 技术采用多主影像进行干涉组合,解决了干涉对的时间和空间失相干问题,从而提高干涉相干性。

1.2 干涉处理

对选取的干涉对进行干涉处理得到干涉相位 φ :

$$\varphi = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noi}} \quad (1)$$

式中: φ_{flat} 为平地相位; φ_{topo} 为地形相位; φ_{def} 为形变相位; φ_{atm} 为大气延迟相位; φ_{noi} 为由成像时系统热噪声引起的噪声相位。

式(1)中平地相位是因选定的参考基准面存在误差而引入的系统误差,可以利用干涉时干涉雷达的几何姿态和相关参数进行多项式拟合去除。地形相位可以利用观测数据和已获得的 DEM 数据通过二次差分去除。地形形变相位方向为卫星视线方向,即所求包含目标形变量的部分。噪声相位可以通过空间滤波的方式进行消除。通过上述对干涉相位的处理,即可得到以形变相位为主的差分干涉相位,用于后续差分干涉相位解缠和形变信息反演。

由于干涉相位中有相位跳变和相位迭掩的情况,因此在轨道精炼和重去平步骤选择地面控制点时,要结合多期相干图信息选择相干性较高的点作为基准点^[10]。

1.3 时序形变反演

SBAS-InSAR 方法是在每个高相干点上建立形变

的估计模型,从而构建方程组,再结合解缠差分干涉相位估计形变。干涉图上高相干点 Q 的待求形变相位用向量表示为

$$\varphi = [\varphi(t_1) \ \varphi(t_2) \ \cdots \ \varphi(t_N)]^T \quad (2)$$

式中: $\varphi(t_N)$ 为第 N 景影像对应时刻高相干点 Q 的相位。

假设 N 景影像(包含主辅影像)共组成 M 个干涉对。干涉对上每个高相干点可以建立获取某一时刻的形变相位向量与解缠差分干涉相位向量间的方程组:

$$A\varphi = \delta\varphi \quad (3)$$

式中: $\delta\varphi$ 为解缠差分干涉相位向量, $\delta\varphi = [\delta\varphi_1 \ \delta\varphi_2 \ \cdots \ \delta\varphi_M]$; A 为 $M \times N$ 阶系数矩阵。

当所有干涉对属于同一个子基线集时,矩阵 A 秩为 N ($M \geq N$),即可得到待求相位的最小二乘解 $\hat{\varphi}$:

$$\hat{\varphi} = (A^T A)^{-1} A^T \delta\varphi \quad (4)$$

当基线集中有多个子集时,式(4)中矩阵 $A^T A$ 为奇异矩阵,利用矩阵的奇异值分解方法求出最小范数意义上的最小二乘解。对矩阵 A 进行奇异值分解得到:

$$A = USW^T \quad (5)$$

式中: U 为 $M \times N$ 阶正交矩阵; S 为奇异值对角矩阵; W 为 $N \times M$ 阶正交矩阵。

此时可求得待求相位的最小二乘解范数解 $\tilde{\varphi}$:

$$\tilde{\varphi} = WS^{-1}U^T\delta\varphi \quad (6)$$

然后,将对待求相位的求解转换成对相位变化速率 v 的求解,即:

$$\begin{aligned} v &= [v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_N]^T \\ &= \left[\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{t_1 - t_0}, \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1}, \cdots, \frac{\varphi_N - \varphi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right]^T \end{aligned} \quad (7)$$

式中: v_N 为第 N 时刻的相位变化速率; φ_N 为第 N 个时刻的相位; t_N 为第 N 时刻。

根据式(7)可得到:

$$\sum_{i=IS_j+1}^{IM_j} (t_i - t_{i-1}) v_i = \delta\varphi_j \quad (8)$$

式中: IM_j 、 IS_j 分别为主、辅影像对应的时间序列 $j=1, 2, \cdots, M$; $\delta\varphi_j$ 为第 j 个解缠差分干涉相位。

简化式(8)可得:

$$Bv = \delta\varphi \quad (9)$$

式中: B 为 $M \times N$ 阶矩阵。

对 B 进行奇异值分解,解出各时间段内的相位变化速率 v ,然后据此计算并恢复相位时间序列,进而可得到形变时间序列。

2 监测区域和监测数据概括

2.1 监测区域

河口村水库工程位于黄河一级支流沁河最后一段峡谷出口处,下距五龙口水文站约 9 km,是控制沁河洪水、径流的关键工程,也是黄河下游防洪工程体系的重要组成部分。前期工程于 2008 年 6 月 12 日开工,主体工程于 2011 年 4 月 30 日开工,2015 年 12 月底主体工程基本完工;2017 年 10 月通过河南省水利厅组织的竣工验收。本文研究区域主要为河口村水库上下游河谷地带以及河谷两岸部分山区(见图 2)。研究区域内地形起伏较大,河谷地区海拔在 200 m 左右,两岸山区海拔最高在 1 000 m 左右。

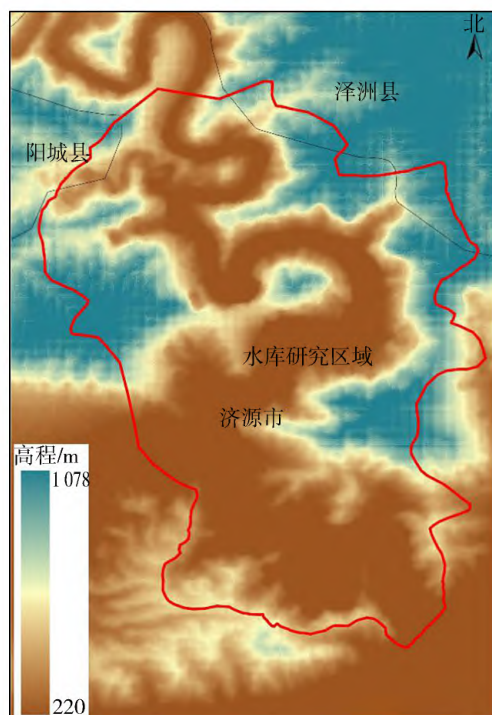


图2 研究区域范围

2.2 监测数据

本文采用 2020 年 1 月 15 日—2020 年 12 月 4 日的共 24 景 C 波段的 Sentinel-1A IW SAR 升轨影像作为本期时序 InSAR 形变监测的基础数据(见表 1),该影像现已被广泛应用于地震、滑坡、矿区开采和地面沉降所引起的地面形变监测研究中。地形相位模拟数据主要采用 SRTM3 数据,该数据是由美国航空航天局

(NASA) 和国防部国家测绘局(NIMA) 联合测量的。SRTM3 数据为空间分辨率约 90 m、平面精度为 20 m、高程精度为 16 m 的全球数字高程模型(DEM) 。

表1 Sentinel-1 SAR 影像数据

序号	影像时间	极化方式	升降轨
1	2020-01-15	VV	升轨
2	2020-01-27	VV	升轨
3	2020-02-18	VV	升轨
4	2020-03-03	VV	升轨
5	2020-03-15	VV	升轨
6	2020-03-27	VV	升轨
7	2020-04-08	VV	升轨
8	2020-04-20	VV	升轨
9	2020-05-02	VV	升轨
10	2020-05-14	VV	升轨
11	2020-06-07	VV	升轨
12	2020-06-19	VV	升轨
13	2020-07-01	VV	升轨
14	2020-07-25	VV	升轨
15	2020-08-06	VV	升轨
16	2020-08-18	VV	升轨
17	2020-08-30	VV	升轨
18	2020-09-11	VV	升轨
19	2020-09-23	VV	升轨
20	2020-10-05	VV	升轨
21	2020-10-29	VV	升轨
22	2020-11-10	VV	升轨
23	2020-11-22	VV	升轨
24	2020-12-04	VV	升轨

注: VV 极化方式表示雷达波垂直发射和垂直接收

本文采用 SBAS-InSAR 技术和前文所述多次测试得到的针对研究区域最优时空基线进行干涉对选择。最终得到的干涉对基线图如图 3 所示,每一景影像至少连接 5 个干涉对,提供足够的观测量。

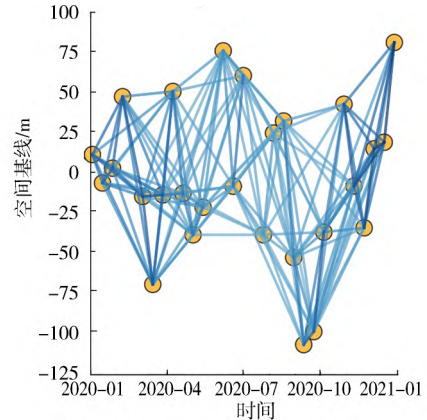


图3 SBAS-InSAR 时空基线

3 时序监测结果分析

综合相干系数以 2020 年 8 月 30 日获取的影像为基准,经影像配准、干涉处理、时序相变反演和其他相关误差项的估计,得到一系列高相干点的卫星视线向(Line of Sight ,LOS) 的形变时间序列(见图 4) 和年平均形变速率[见图 5(a)],图中蓝色代表形变方向与 LOS 向相反、红色表示形变方向与 LOS 向一致。

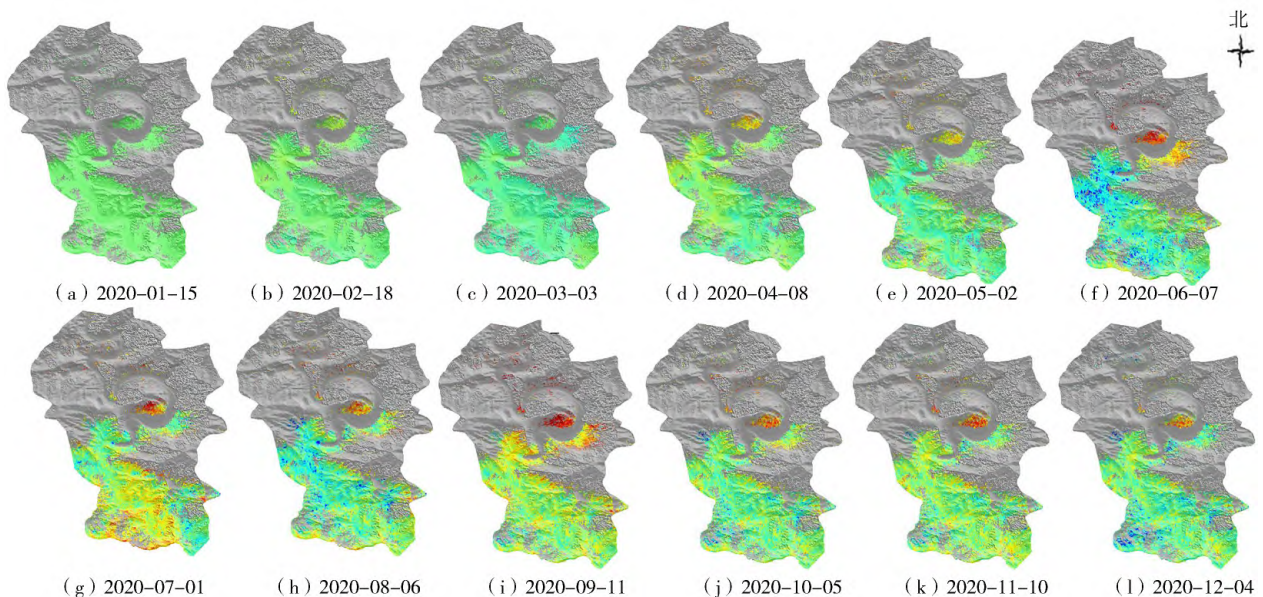


图4 形变时间序列

为探讨研究区域内监测时间段地表形变在时间上的变化规律,按月提取了研究区域形变时间序列(见图 4,自 2020 年 1 月 15 日起的累积形变量)。从图 4

中可以看出河口村水库周边区域较为稳定,无显著变形现象;上游部分区域出现夏季受降雨影响形变量增大的情况。为了进一步分析河口村水库的变化,图 5

分别展示了河口村水库管理范围的年平均形变速率[见图 5(a)]和水库可见光影像[见图 5(b)],其中底

图为高分 2 全色和多光谱融合影像。

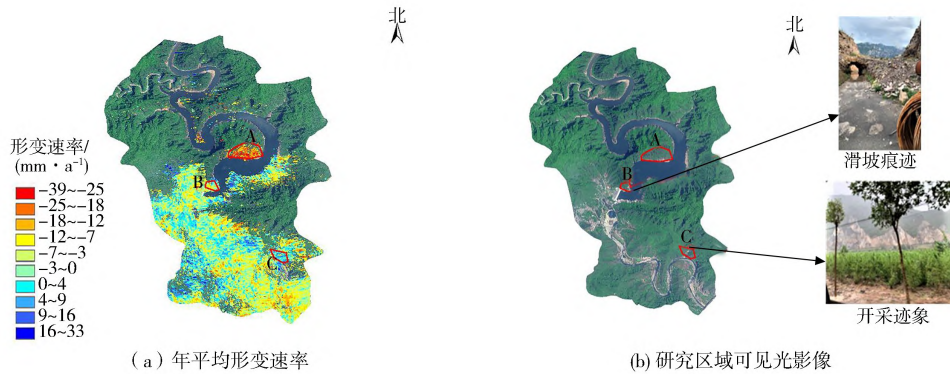


图 5 年平均速率和可见光影像图示意

由图 5(a)可知,研究区域整体平均形变速率在 $-39\sim33\text{ mm/a}$ 范围内,绝大部分区域处于相对稳定的状态,形变速率在 $-10\sim4\text{ mm/a}$ 范围内。根据平均形变速率共识别出 3 处明显形变区,分布在河口村水库的上游 A 区和下游 B 区、C 区[见图 5(b)],根据当地水库工作者介绍和现场照片显示,该区域曾经有石头开采痕迹,这种现象易引发滑坡灾害,需重点关注和及时防范。如图 6 所示,截取放大了水库后坝区附近形变速率情况以及地表实地情况。从图 6 中可知水库坝体部分区域存在轻微的形变,形变速率为 5 mm/a 左右,实地考察发现形变区域附近地表存在轻微细小裂纹。

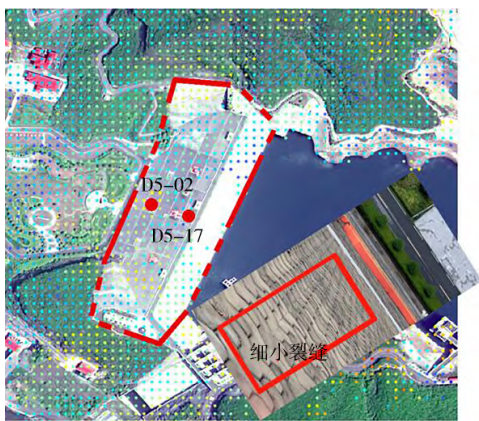


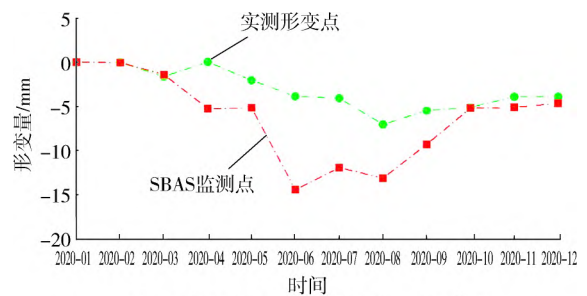
图 6 后坝区形变速率

为了探讨 SBAS-InSAR 技术对库区形变监测的适用性,提取了地面监测点 D5-02 和 D5-17 的 GNSS 监测数据以及监测点周围半径 10 m 内的 SBAS-InSAR 监测的高相干点形变时间序列进行对比验证。由于 SBAS-InSAR 监测的是 LOS 向的形变,与 GNSS 监测方向不一致,因此结合卫星参数将两点的 SBAS-InSAR 监测结果转换到垂直方向进行对比(见表 2)。

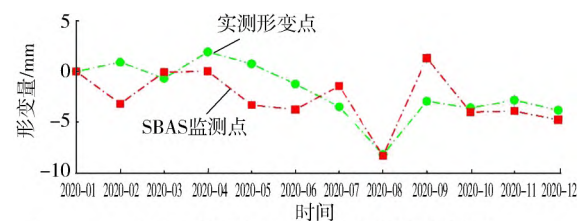
表 2 点 D5-02 和点 D5-17 水准和 InSAR 形变监测结果对比统计

时间	点 D5-02		点 D5-17	
	水准实测	InSAR 监测	水准实测	InSAR 监测
2020-01	0	0	0	0
2020-02	-0.04	-0.04	0.91	-3.20
2020-03	-1.62	-1.40	-0.70	-0.07
2020-04	0.03	-5.25	1.93	0.02
2020-05	-2.05	-5.15	0.75	-3.33
2020-06	-3.87	-14.45	-1.26	-3.77
2020-07	-4.08	-11.93	-3.49	-1.45
2020-08	-7.04	-13.12	-8.24	-8.36
2020-09	-5.47	-9.29	-2.96	1.32
2020-10	-5.10	-5.18	-3.61	-4.03
2020-11	-3.91	-5.11	-2.84	-3.93
2020-12	-3.91	-4.64	-3.84	-4.79

图 7(a)、(b) 分别为后坝区域 D5-02、D5-17 监测点的 SBAS-InSAR 形变时间序列和实测形变时间序



(a) 后坝区域 D5-02 监测点形变时间序列



(b) 后坝区域 D5-17 监测点形变时间序列

图 7 对比验证

列对比。通过对比实测形变曲线和 SBAS 形变曲线,发现 SBA-InSAR 技术受大气、噪声等影响,形变时序曲线存在相对较大的随机波动,但整体的变化规律和同期累积形变量基本与实测数据保持一致。对比结果反映了 2020 年试验得出的累积形变量与实测结果基本一致,验证了本文时序 SBAS-InSAR 形变监测的适用性。

4 结 论

时序 InSAR 技术是一种新型的遥感监测手段,能够获取高精度的形变信息。本文结合水库独特的地理环境,利用 SBAS-InSAR 监测技术的优势,重点研究后坝区形变特性,探测后坝体表面高质量的散射体目标,并采用地面控制点来对干涉相位和解缠相位进行修正,提取较高精度的时序形变信息,通过地面验证数据得出,该形变趋势与地面监测数据具有一定的相似性,表明 SBAS-InSAR 能够揭示水库及周边的形变信息,为后序维持水库的稳定性和减轻黄河下游大堤的防洪压力提供数据支撑。今后的工作需要综合分析形变原因对形变区域作重点监测,及时治理河口村水库管理范围内影响较大的滑坡和自身沉降区域。

致谢:河南省济源市河口村水库管理局为本研究提供了地面监测数据,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 郑会春,李泽民,张晓瑞,等.沁河河口村水库工程竣工验收设计工作报告[R].郑州:黄河勘测规划设计有限公司,2017:204.

(上接第 129 页)

以往的内、外衬分离单独受力的双层衬砌结构相比,具有施工难度小、施工效率高、施工质量容易保证、工程造价低等优点,对于承担一定内水压力的盾构输水隧洞可推广使用。

参考文献:

- [1] 杨方勤.青草沙输水隧道盾构施工期力学性能分析[J].城市道桥与防洪,2011,28(8):269-272.

- [2] LIU L,ZHANG T,WAHR J.InSAR Measurements of Surface Deformation over Permafrost on the North Slope of Alaska[J].Journal of Geophysical Research,2010,115(F3):F03023.
- [3] 廖明生,唐婧,王腾,等.高分辨率 SAR 数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J].中国科学:地球科学,2012,42(2):217-229.
- [4] 裴媛媛,廖明生,王寒梅.时间序列 SAR 影像监测堤坝形变研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2013,38(3):266-269.
- [5] 张艳梅,王萍,罗想,等.利用 Sentinel-1 数据和 SBAS-InSAR 技术监测西安地表沉降[J].测绘通报,2017(4):93-97.
- [6] 蒲川豪,许强,赵宽耀,等.利用小基线集 InSAR 技术的延安新区地面抬升监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(7):983-993.
- [7] FERRETTI A,PRATI C,ROCCA F.Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2202-2212.
- [8] FERRETTI A,PRATI C,ROCCA F.Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J].IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2001,39(1):8-20.
- [9] 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 & Remote Sensing,2002,40(11):2375-2383.
- [10] 张堯.基于 InSAR 技术大同煤田沉陷区的监测与识别[D].北京:中国地质大学,2020:12-15.

【责任编辑 简 群】

- [2] 翟明杰,付云升,韩宇.北京南水北调配套工程隧洞衬砌结构型式分析[J].人民黄河,2015,37(12):96-98,102.
- [3] 钮新强,符志远,张传健.穿黄盾构隧洞新型复合衬砌结构特性研究[J].人民长江,2011,42(8):8-13.
- [4] 王志国,顾小兵,程子悦,等.西江引水工程盾构输水隧洞设计[J].水利水电工程设计,2016,35(1):1-3.

【责任编辑 张华岩】