

中文引用格式:周怡,彭国文,黄召,等. 基于SBAS-InSAR和BPNN的铀尾矿坝形变智能监测与预测[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 145-152.

英文引用格式:ZHOU Yi, PENG Guowen, HUANG Zhao, et al. Intelligent monitoring and prediction of deformation of uranium tailings dam based on SBAS-InSAR and BPNN[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 145-152.

基于 SBAS-InSAR 和 BPNN 的铀尾矿坝形变 智能监测与预测*

周怡¹, 彭国文^{**1}教授, 黄召², 阳鹏飞¹, 刘丹丹¹, 陈小丽¹

(1 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2 中核二七二铀业有限责任公司, 湖南 衡阳 421004)

中图分类号: X945; X924.3 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1693

基金项目: 国家自然科学基金资助(42377076); 湖南省自然科学基金资助(2023JJ50129)。

【摘要】 为提高铀尾矿库退役治理的监测工作效率, 提出一个基于小基线合成孔径雷达干涉测量(SBAS-InSAR)技术和反向传播神经网络(BPNN)的铀尾矿库形变智能监测与预测模型。首先, 利用SBAS-InSAR技术得到铀尾矿库2020年12月—2022年12月的累计形变量与年均形变速率, 并用第一拦水坝的7个全球导航卫星系统(GNSS)监测站验证InSAR监测值的精度; 然后, 选取铀尾矿库中的雷公塘坝、南坡横坝、战斗坝和松林坝4个坝段的累计沉降量并结合降雨量进行沉降分析; 最后, 随机提取铀尾矿坝100个沉降点的累积沉降数据, 通过BPNN预测铀尾矿坝的形变。结果表明: 2年间铀尾矿库的形变速率在 $-60.06 \sim 34.94$ mm/a, 铀尾矿坝整体处于下沉状态, 累计沉降量最大为 -46.67 mm。BPNN预测值与实际监测值的平均绝对误差为 0.586 mm, 均方误差为 0.624 mm。

【关键词】 小基线合成孔径雷达干涉测量(SBAS-InSAR); 反向传播神经网络(BPNN); 铀尾矿库; 形变智能监测; Sentinel-1A

Intelligent monitoring and prediction of deformation of uranium tailings dam based on SBAS-InSAR and BPNN

ZHOU Yi¹, PENG Guowen¹, HUANG Zhao², YANG Pengfei¹, LIU Dandan¹, CHEN Xiaoli¹

(1 School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China,

Hengyang Hunan 421001, China; 2 China National Nuclear Corporation 272 Uranium

Industry Co., Ltd., Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: To improve the efficiency of monitoring work in the retirement treatment of uranium tailings ponds, an intelligent monitoring and prediction model of deformation of uranium tailings ponds was proposed based on SBAS-InSAR technology and BPNN. Firstly, SBAS-InSAR technology was used to obtain the cumulative deformation and annual deformation rate of the uranium tailings pond over the past two years. The accuracy of InSAR monitoring values was verified using seven Global Navigation Satellite System (GNSS) monitoring stations on the first dam. Then, the cumulative settlement of four dam

* 文章编号: 1003-3033(2024)04-0145-08; 收稿日期: 2023-12-15; 修稿日期: 2024-01-18

** 通信作者: 彭国文(1978—), 男, 江西抚州人, 博士, 教授, 主要从事核设施退役处理与环境修复等方面的研究。E-mail: pgwnh78@163.com。

sections, including Leigongtang dam, nanpo cross dam, Battle dam and Songlin dam, was selected and analyzed in conjunction with rainfall. Finally, the cumulative settlement data of 100 settlement points of the uranium tailings dam were randomly extracted to predict the deformation of the uranium tailings dam. The results show that from December 2020 to December 2022, the deformation rate of uranium tailings dam is between $-60.06-34.94$ mm/a. The overall settlement of the uranium tailings dam is in a sinking state, with a maximum cumulative settlement of -46.67 mm. The average absolute error between the predicted values of BPNN and the actual monitoring values is 0.586 mm, and the mean square error is 0.624 mm.

Keywords: small baseline subset-interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR); back propagation neural network (BPNN); uranium tailings pond; intelligent deformation monitoring; sentinel-1A

0 引言

随着铀矿冶工业的不断发展,我国对核能资源需求量日益增加,其中,在运核机组为 55 台,装机容量达到 5703 万 kW,建设了 200 多个铀矿床(田)以及十几个厂矿,铀矿资源总量超过 280 万 t。铀尾矿库储存铀矿石冶炼和浓缩过程中产生的放射性废物,含有铀、镭、钍等多种天然放射性核素以及衰变产生的氡和氡子体,铀尾矿库如果堤坝破裂或溢流,可能对周围水体和土壤造成污染,对人类和生态系统构成严重威胁。2010 年广东信宜紫金矿业溃坝共造成 22 人死亡,直接损失 1900 万元^[1];2019 年 Córrego do Feijao 铁矿山尾矿库的倒塌释放约 1 200 万 m³ 的尾矿,造成 240 多人死亡^[2]。提升铀尾矿库的监测效率,及时识别危险因素和提取灾害信息,精准监测和预测坝体形变,不仅是确保铀矿业可持续发展的必要条件,也是关乎自然环境保护、人体健康和社会稳定的重要保障^[3]。

目前,铀尾矿库形变的监测方法主要为测量机器人、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)和传统水准测量等^[4]。测量机器人和 GNSS 虽然能够提供实时、精确的监测结果,但是只能监测铀尾矿库的局部形变,工作效率低。传统水准测量虽然监测精度高,但易受复杂地形的限制,不能全面监测铀尾矿库。相比之下,合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术具有低成本、全范围监测、高精度等优势^[5],它能够不受地面条件的限制,提供高分辨率的坝体形变信息^[6]。ZHANG Peng 等^[7]将永久散射体(Persistent Scatterer, PS)-InSAR 与小基线(Small Baseline Subset, SBAS)-InSAR 技术相结合,利用不同雷达反射区域融合不同干涉测量的数据来监测宿州地面沉降,发现 SBAS-InSAR 技术在监测乡村植

被区时精度更高;陈娅男等^[4]利用 SBAS-InSAR 技术监测覆砂石尾矿坝的整体形变,发现 SBAS-InSAR 能事后追溯尾矿坝的时序形变演化过程;王雪丽等^[8]运用 SBAS-InSAR 升降轨融合技术监测尾矿库地表形变,融合升轨和降轨的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据能有效提高监测精度;李洋洋等^[9]利用 SBAS-InSAR 技术监测了大理市地面的沉降,并利用反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)模型预测大理市的地表沉降。综上,SBAS-InSAR 技术能够智能监测地表沉降和尾矿库形变,铀尾矿库是一种大型的人工构筑物,由于其稳定性高、形变较缓慢,具备长期有效监测的高相干性,但目前研究较少将 InSAR 技术应用于铀尾矿库的形变智能监测。

鉴于此,笔者拟基于 SARscape 软件,利用 SBAS-InSAR 技术对铀尾矿库进行形变智能监测,获取铀尾矿库 2020 年 12 月—2022 年 12 月的累积形变量和年平均形变速率图,并利用 BPNN 模型选取 100 个沉降点的累积沉降数据,预测铀尾矿坝的形变,以期对铀尾矿库的退役治理提供一定的参考依据。

1 铀尾矿库概况及 SAR 数据

1.1 铀尾矿库概况

某铀尾矿库位于湖南衡阳市珠晖区东阳渡(东经 $112^{\circ}38'$,北纬 $26^{\circ}47'$),占地面积约 170 万 m²,库内的滩面面积约 136 万 m²^[10]。该铀尾矿库属于二等库,是铀矿冶系统中最大的尾矿库,已被国家列入环保安全应急管理重点尾矿库^[11]。研究区域地理位置如图 1 所示。

1963 年,该铀尾矿库建成并投入使用,1994 年,国家决定将该企业铀水冶线停产,铀尾矿库也随之进行退役处理,设计采用的退役治理方法是将尾矿

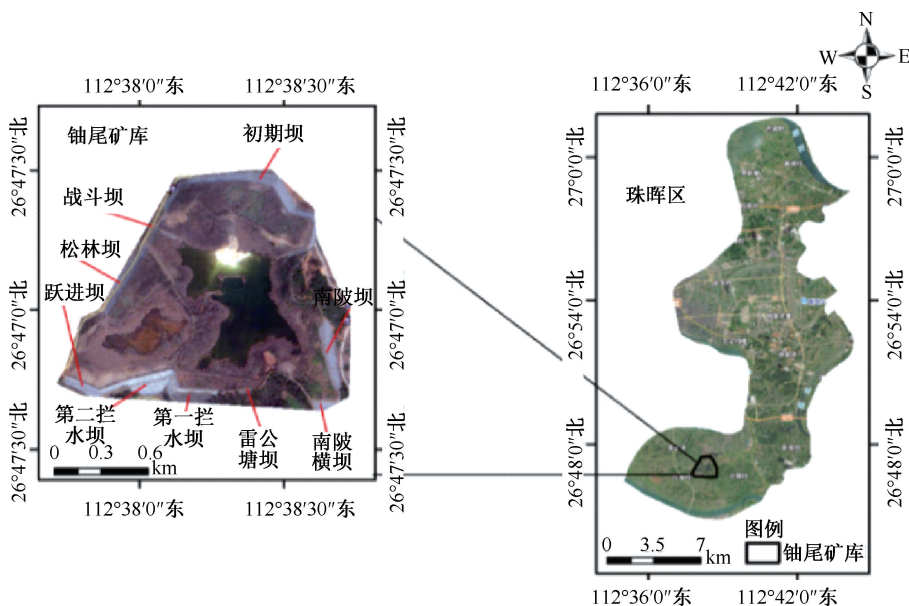


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of research area

坝坡全部覆盖 1 m 厚的黏土,并用砂卵石垫层及干砌块石护砌;尾矿滩面覆盖 1 m 厚的黏土,并在其表面植草护面。该铀尾矿库与居民生活区距离较近,除此之外该尾矿库已退役近 30 年,地形也随之发生一些改变,存在一些安全隐患,如坝面排水渠及坝端截水沟护砌的形变和磨蚀在短期的强降雨时会导致沟内淤堵;堆积坝在长时间内沉降不均会造成坝体结构破坏,形成坝坡渗流。铀尾矿库一旦发生溃坝事故,将对周围的居民及生态系统造成极大的威胁,因此,急需采取可靠且有效的方法长期监测铀尾矿库的形变。

1.2 SAR 数据

SAR 数据来自欧空局网站 (<https://scihub.copernicus.eu/dh-us/#/home>) 中的 Sentinel-1A 卫星。Sentinel-1A 卫星配备了 C 波段合成孔径雷达,具有高分辨率、高抗干扰性,可进行全天候、大范围的地表监测^[12]。

2020 年 12 月—2022 年 12 月,每月从研究区随机选取一天某时刻的 SAR 图像,总共 24 景 Sentinel-1A 数据进行试验。采用基于美国航天航空局空间分辨率为 30 m 的数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 校正地表特征,使用对应图像日期的卫星精密轨道星历数据修正轨道信息。

2 铀尾矿库监测与预测技术

2.1 SBAS-InSAR 技术

SBAS-InSAR 技术是一种基于多主影像的 InSAR

时间序列方法,其主要特点在于利用时空基线较短的干涉对来提取地表形变信息^[13]。相对于传统的 PS-InSAR 技术,SBAS-InSAR 技术克服了 PS-InSAR 因选取一幅影像作为公共主影像而引起的部分干涉图相干性较差的不足;还同时降低了对 SAR 数据的需求量,运算效率较高^[14]。因此,SBAS-InSAR 技术被广泛应用于低相干地区的地表形变智能监测^[15]。

2.2 SBAS-InSAR 技术与 BP 神经网络相结合

1986 年, RUMELHART 等^[16] 提出 BP 神经网络,它由输入层、隐藏层、输出层 3 部分组成,其核心为前向传播和误差反向传播^[17]。

将 SBAS-InSAR 技术与 BPNN 相结合,构建出一个基于 SBAS-InSAR 技术和 BPNN 的铀尾矿库形变智能监测与预测模型。采用 SBAS-InSAR 技术,提取形变时间序列作为 BPNN 的输入,构建 BPNN 的训练数据集。利用已知的一部分铀尾库形变数据训练 BPNN,另一部分形变数据作为期望输出值,不断调整网络权值和参数,提高预测精度。SBAS-InSAR 技术与 BPNN 主要处理流程如图 2 所示。

3 SBAS-InSAR 数据处理及结果分析

3.1 SBAS-InSAR 数据处理

基于 ENVI-SARscape 软件处理 2020 年 12 月 9 日—2022 年 12 月 23 日的 24 景 SAR 数据。为避免时间和空间失相干,设置时间基线为 150 天,空间基线阈值为 3%,系统自动主选定 2021 年 12 月 16 日

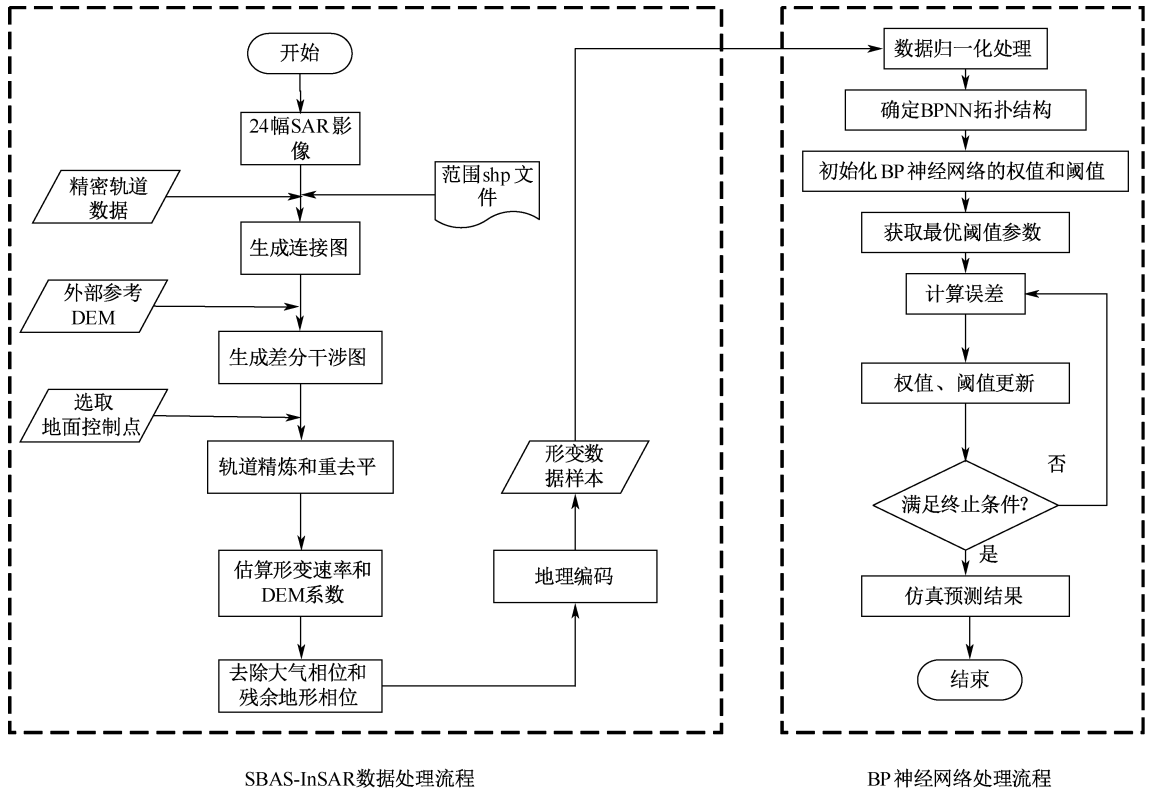


图2 SBAS-InSAR技术与BPNN主要处理流程
Fig. 2 Main processing flow of BPNN and SBAS-InSAR technology

为超级主影像,生成的时间和空间基线连接图如图3所示。图中图像两两配对组成干涉对,不存在单独影像,总共生成86个干涉对。

在SAR影像配对组合后再进行差分干涉处理,包括影像配准、生成干涉图、去平、滤波和相位解缠。为减小大气干扰、提高影像的相干性,将多视比设置为4:1;采用30m精度的外部DEM消除地形及平地相位;滤波采用Goldstein自适应滤波方法;相位解缠采用最小费用流进行2D解缠。在较稳定的区域选取连续的30个地面控制点,通过地面控制点对干涉图进行轨道精炼和重去平,估算和消除残余的

恒定相位。然后进行地表形变反演,设定输出相干系数阈值为0.25,第1次反演在估算形变速率和残余地形的同时进行2次解缠;第2次反演在时间域和空间域上分别采用高通滤波和低通滤波来估算与去除大气相位。在得到最精确的时序形变结果后,通过地理编码将其转换到1984年世界大地测量系统下。

3.2 精度验证

选择位于第一拦水坝的7个GNSS监测站来验证SBAS-InSAR技术处理数据的精确度,GNSS监测

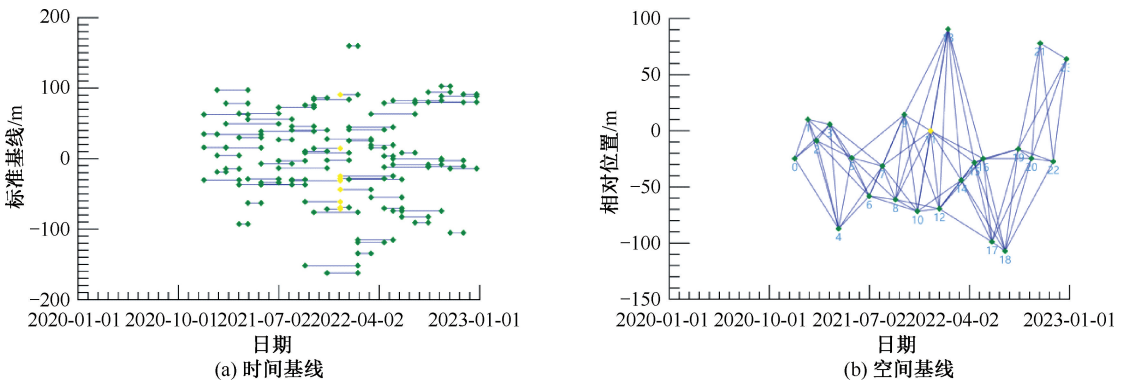


图3 时空基线连接图
Fig. 3 Spatiotemporal baseline connection diagram

站点分布位置如图4所示,其中,坝顶的3个监测站代号为a、b、c,环坝公路与排水渠间坡面的2个监测站代号为d、e,排水沟平面的2个监测站代号为f、g。选取2022年2—11月期间以各个GNSS监测站为圆心,半径为20 m的圆形缓冲区内的5个SBAS-InSAR年形变速率,并求平均值 H ,再与这个时间段内GNSS站点监测的垂直方向的表面位移年形变速率 P 作比较,计算其绝对误差 R ,绝对误差的计算式为:

$$R = H - P \quad (1)$$

GNSS测量值与InSAR监测值及其误差统计见表1。由表1可知:GNSS测量值与InSAR监测值的绝对误差 R 的范围在 $-1.41 \sim 2.55$ mm/a。由于GNSS提供的是点位测量,能捕捉坝体小范围内的显著变化,精度更高。而InSAR技术易受植被、大气条件等的影响,其监测的沉降值较GNSS测量值而言普遍较小,但其绝对误差相对较小。因此,SBAS-InSAR能作为监测铀尾矿坝的有效技术手段。



图4 GNSS监测站点分布

Fig. 4 GNSS survey site distribution

表1 GNSS测量值与InSAR监测值及其误差统计

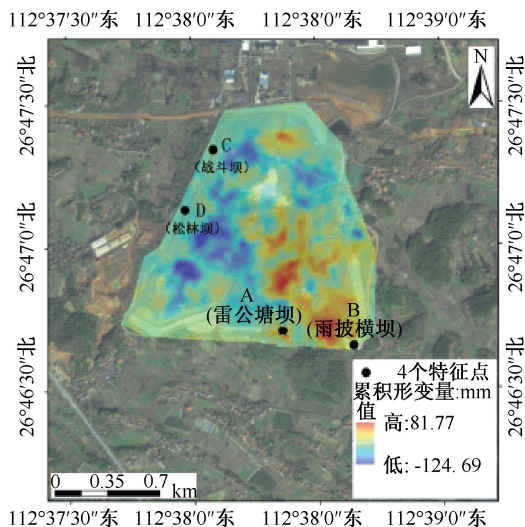
Tab. 1 GNSS measurement values and InSAR

monitoring values and their error statistics mm/a

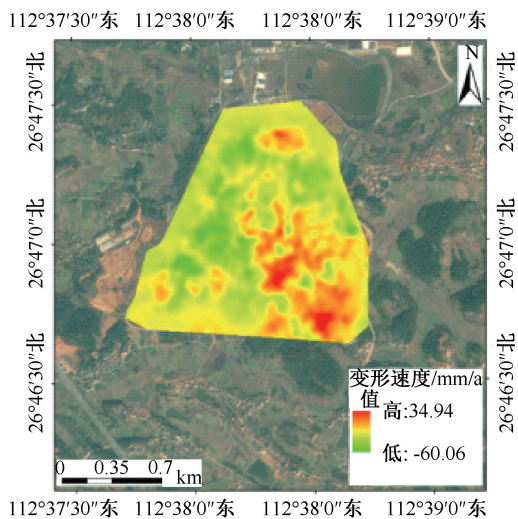
GNSS 站点	H	P	R
a	-14.09	-15.12	1.03
b	-16.12	-16.59	0.47
c	-8.33	-7.41	-0.92
d	-8.56	-7.15	-1.41
e	-12.84	-14.44	1.6
f	-7.46	-10.01	2.55
g	-10.76	-12.63	1.87

3.3 铀尾矿库形变分析

研究区的累积形变量及年均形变速率如图5所示,图例中正值代表上升,负值代表下沉。从监测结果看,铀尾矿库的整体形变是不均匀的,形变速率在 $-60.06 \sim 34.94$ mm/a。铀尾矿坝体整体都处于下沉状态,形变速率范围为 $-23.34 \sim -2.96$ mm/a,其中,战斗坝和松林坝的形变最严重,累积沉降量最大,分别为 -46.18 和 -46.67 mm;雷公塘坝和南坡横坝最为稳定,最大累积沉降量只有 -12.17 和 -19.65 mm。



(a) 铀尾矿库累积形变



(b) 铀尾矿库年均形变速率

图5 铀尾矿库累积形变量及年均形变速率

Fig. 5 Accumulated deformation and annual deformation rate chart of uranium tailings pond

滩面内部高低不平是由于滩面内的尾矿分布不均匀,西南部较低,东北部较高,其中,大部分处于下沉状态,最大累积沉降量为 -124.69 mm,在铀尾矿库东南角有一小部分滩面是上升状态,最大累积上

升量为 60.31 mm,上升原因主要是因为雨水期间细颗粒尾矿会被挟带至南坡坝前的低洼处沉积。

为进一步研究铀尾矿坝 2 年内的形变特征,分别在雷公塘坝 A、南坡横坝 B、战斗坝 C 和松林坝 D 等 4 个坝段随机选取一个特征点,4 个特征点位置如图 5a 所示。结合 2020 年 12 月—2022 年 12 月的降雨量绘制时间序列累积沉降图,分析其沉降成因,如图 6 所示。从图 6 可以看出,C 点和 D 点的沉降

速率比 A 点和 B 点的沉降速率较大,雷公塘坝和南坡横坝靠近丘陵,植被密度高,植被根系维持地表稳定性,累积沉降量较少且沉降速率低。战斗坝和松林坝受雨季的影响,形变幅度较大。战斗坝和松林坝是由黏土初期坝和尾矿堆积坝组成,矿泥与尾砂的含量不一,其中,尾矿堆积坝含有大量的尾粉砂和尾细砂,其渗透系数较大,排水速度较快,因此,松林坝沉降速率较大。

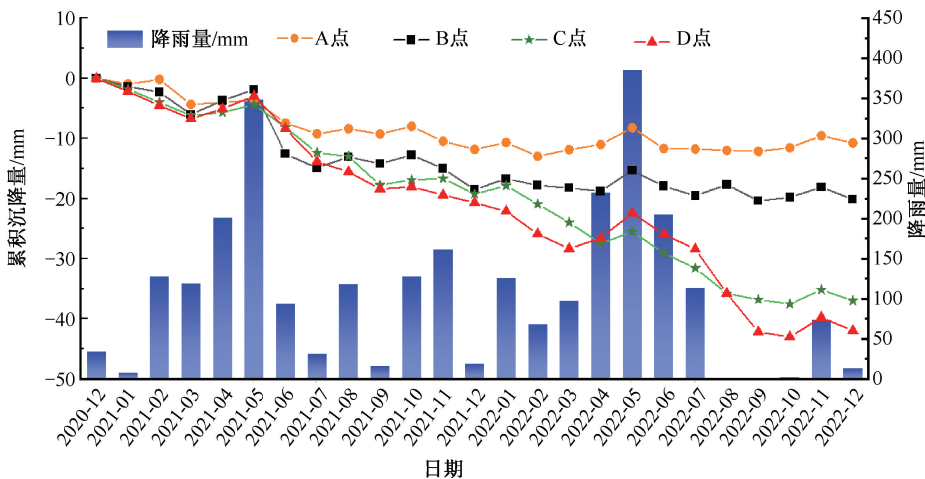


图 6 降雨量以及特征点累积沉降

Fig. 6 Rainfall and cumulative settlement map of characteristic points

图 6 中,在 2021—2022 年的 5 月份雨季期间以及 2022 年 11 月份,4 个特征点处略有抬升,当雨季结束后长时间不降雨,坝体便会持续沉降。此外,当降雨量突然大幅增加时,坝体也可能表现出地表的“抬升”现象。这是由于雨季期间的大量雨水回灌导致地下水位上升,地表吸水膨胀,从而触发周期性的“抬升”现象。但随着雨季的结束,降雨量急剧减小,地表水分被蒸发后大量流失,地表便会出现明显地骤降。

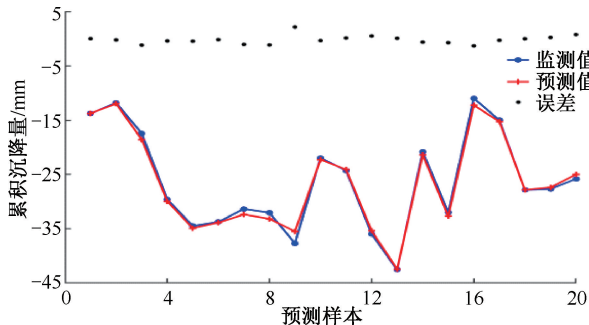


图 7 BPNN 模型预测值与监测值对比

Fig. 7 Comparison between predicted and monitored values of BPNN model

3.4 铀尾矿库形变预测

由于参数的选择和样本的选取会影响 BPNN 的精度,因此,为提高模型预测的准确性,利用 SARscape 软件随机并均匀地从 9 个坝段提取 2020 年 12 月—2022 年 12 月 100 个沉降点的累计沉降量,其中,80 个作为样本进行 BPNN 训练,后 20 个作为预测样本。将 2020 年 12 月—2022 年 11 月每 8 个月的累计沉降值作为输入层,即输入层节点数为 3,2022 年 12 月的沉降值作为输出层,即输出层节点数为 1,同时,设置隐藏层节点数为 9。BPNN 模型预测值与监测值对比如图 7 所示,BPNN 模型预测结果如图 8 所示。

从图 7 可以看出,BPNN 模型的预测值与实际监测值整体保持较高的一致性,其中,平均绝对误差为 0.586 mm,均方误差为 0.624 mm。

从图 8 可以看出,训练集样本的相关性达到 0.998,验证集、测试集以及整体的相关性也都超过 0.99,证明该模型效果较好。

4 结 论

通过 SBAS-InSAR 技术对铀尾矿库进行形变智

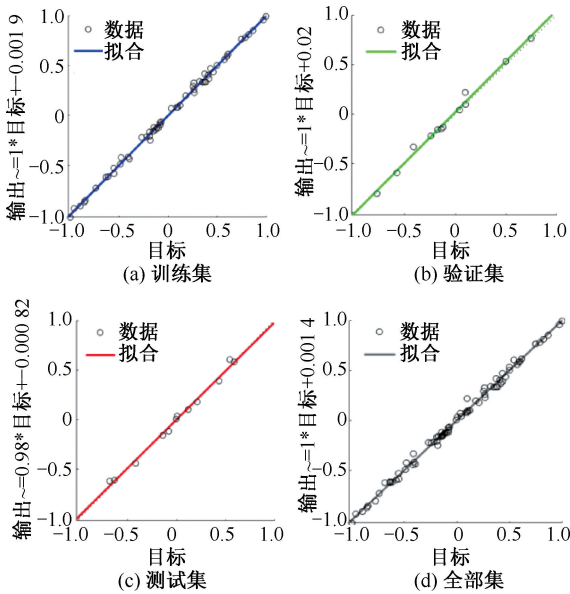


图8 BPNN模型预测的结果

Fig. 8 Prediction result by BPNN model

能监测,获取铀尾矿库2020年12月—2022年12月的累积形变量和年均形变速率,并利用BPNN模型预测铀尾矿坝沉降,结论如下:

1) 铀尾矿库的沉降速率范围为 $-60.06 \sim -34.94$ mm/a,其中,9个坝段都处于沉降状态,形变速率范围为 $-23.34 \sim -2.96$ mm/a。用第一拦水坝的7个GNSS监测站验证InSAR监测值的精度,结果表明:SBAS-InSAR监测技术监测铀尾矿库的形变具有可行性。

2) 降雨量对铀尾矿坝形变具有显著的影响,在每年5月份左右的雨季期间,大量的降雨会导致地下水水位上升,地表吸水膨胀,坝体都会出现3~7 mm的抬升。

3) 利用BPNN模型预测分析随机提取铀尾矿坝100个沉降点的累积沉降数据的形变,结果表明:监测值与预测值整体保持很高的一致性。可以利用构建的BPNN模型预测铀尾矿库未来形变。

参考文献

- [1] 刘晓杰. 星载雷达遥感广域滑坡早期识别与监测预测关键技术研究[D]. 西安:长安大学, 2022.
LIU Xiaojie. Research on key technologies for early identification, monitoring and forecasting of wide-area landslides with spaceborne radar remote sensing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [2] DU Zheyuan, GE Linlin, ALEX H, et al. Risk assessment for tailings dams in Brumadinho of Brazil using InSAR time series approach[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137125.
- [3] 潘英杰. 铀尾矿库的辐射安全及事故预防对策[J]. 铀矿冶, 2002(4): 200-204.
PAN Yingjie. Radiation safety and accident prevention countermeasures for uranium tailing impoundment[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2002(4): 200-204.
- [4] 陈娅男, 李素敏, 郭瑞, 等. 基于时序InSAR的覆砂石尾矿坝形变演化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 31-37.
CHEN Ya'nan, LI Sumin, GUO Rui, et al. Study on deformation evolution of sandstone-covered tailings dam based on time series InSAR[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(4): 31-37.
- [5] 李勇发, 左小清, 麻源源, 等. 基于PS-InSAR技术和遗传神经网络算法的矿区地表沉降监测与预计[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 845-851.
LI Yongfa, ZUO Xiaoqing, MA Yuanyuan, et al. Surface subsidence monitoring and prediction based on PS-InSAR technology and genetic neural network algorithm [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 845-851.
- [6] 程刚, 王振雪, 李刚强, 等. 滑坡一体化全维度监测预警技术进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 105-114.
CHENG Gang, WANG Zhenxue, LI Gangqiang, et al. Progress and prospect of integrated full-dimensional monitoring and early warning technology for landslides[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 105-114.
- [7] ZHANG Peng, GUO Zihao, GUO Shuangfeng, et al. Land subsidence monitoring method in regions of variable radar reflection characteristics by integrating PS-InSAR and SBAS-InSAR techniques[J]. Remote Sensing, 2022, 14(14): DOI: 10.3390/rs14143265.
- [8] 王雪丽, 王卫红, 王立娟, 等. 基于SBAS-InSAR升降轨融合的尾矿库地表形变监测[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(4): 43-48, 78.

- WANG Xueli, WANG Weihong, WANG Lijuan, et al. Monitoring of ground deformation around tailings pond by integrating of ascending and descending path based on SBAS-InSAR[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(4): 43-48, 78.
- [9] 李洋洋,左小清,肖波,等.基于SBAS-InSAR和BP算法的大理市地面沉降监测及预测[J].贵州大学学报:自然科学版,2023,40(4):39-47.
- LI Yangyang, ZUO Xiaoqing, XIAO Bo, et al. Monitoring and prediction of ground subsidence in Dali city based on SBAS-InSAR and BP algorithm[J]. Journal of Guizhou University: Natural Science Edition, 2023, 40(4): 39-47.
- [10] 蒋复量,吴浩楠,刘永,等.基于灰色关联度和变权理论的地震条件下铀尾矿库群坝安全评价研究[J].南华大学学报:自然科学版,2020,34(1):22-28.
- JIANG Fuliang, WU Haonan, LIU Yong, et al. Safety evaluation of uranium tailings dams under earthquake based on gray relational analysis and variable weight theory[J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2020, 34(1): 22-28.
- [11] 赵发,刘玉生,沈立华,等.基于北斗的铀尾矿库综合监控平台设计[J].铀矿冶,2023,42(2):76-82.
- ZHAO Fa, LIU Yusheng, SHEN Lihua, et al. Comprehensive monitoring platform design of uranium tailings pond based on BDS[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(2): 76-82.
- [12] 董建军,梅媛,李昕,等.高海拔排土场边坡安全稳定性SBAS-InSAR监测[J].中国安全科学学报,2022,32(1):92-101.
- DONG Jianjun, MEI Yuan, LI Xin, et al. SBAS-InSAR monitoring of slope safety and stability of high altitude dumps[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 92-101.
- [13] 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): 1 717-1 733.
- ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1 717-1 733.
- [14] ZHANG Qingyun, LI Yongsheng, ZHANG Jingfa, et al. InSAR technique applied to the monitoring of the Qinghai-Tibet railway[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19(10): 2 229-2 240.
- [15] ZHANG Rui, ZHANG Weiguang, HUANG Wei, et al. High-precision monitoring method for airport deformation based on time-series InSAR technology [J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2022.130144.
- [16] 眭嘉里,严波,林翔,等.基于BP神经网络的悬垂绝缘子串风偏角预测模型[J].重庆大学学报,2021,44(8):114-124.
- SUI Jiali, YAN Bo, LIN Xiang, et al. BP neural network model for dynamic swing angle of suspended insulator string[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(8): 114-124.
- [17] 董道国,朱建龙,方瑾.基于神经网络的建筑能耗及设备故障预测方法研究[J].智能建筑与智慧城市,2022(4):148-150.
- DONG Daoguo, ZHU Jianlong, FANG Jin. Research on building energy consumption and equipment failure prediction method based on neural network[J]. Intelligent Building and Smart City, 2022(4): 148-150.

作者简介: 周怡 (2000—),女,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为 InSAR 技术、安全监测与预警、放射性废物处置。E-mail:1273003687@qq.com。

