引文格式：张辉, 党星海, 李旺平, 等. 基于Sentinel-1A数据的黑方台地区沉陷特征分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 52-58. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.03.012

基于Sentinel-1A数据的黑方台地区沉陷特征分析

张　辉[1]，党星海[1,2]，李旺平[1]，赵健赟[3]，贾丽奇[4]，张秀霞[1]，郝君明[1]，周兆叶[1]，樊新成[2]
（1. 兰州理工大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730050；2. 兰州理工大学 建筑勘察设计院，甘肃 兰州 730050；
3. 青海大学 地质工程系，青海 西宁 810016；4. 兰州理工大学 设计艺术学院，甘肃 兰州 730050）

摘　要：甘肃黑方台地区由于长期大水漫灌引起台塬沉陷、塬边滑坡等自然灾害。为研究沉陷区域的空间分布特征和成因，以2017年9月—2020年11月的Sentinel-1A影像为数据源，利用永久散射体（PS）与短基线集（SBAS）技术提取研究区地表沉陷信息；选取新源村与党川村滑坡高相干点D_1、D_2，结合灌溉、降雨、温度数据对两种结果进行交叉验证与分析。结果表明：①两种技术识别的沉陷区域主要分布于新源村、方台村、朱王村、陈家村以及台塬周边，利用PS与SBAS技术在新源村和党川村解算得到的最大年均沉降速率分别为31.75 mm、28.65 mm和32.6 mm、28.4 mm，两种技术在空间分布和解算结果上一致性较高，SBAS技术提取的沉降点数量多于PS技术；②由于2—3月温差较大，随着温度升高引起冻土融化，新源村与党川村滑坡均出现沉陷趋势，6—8月灌溉量和降雨量增多，导致黄土台塬沉陷，滑坡频发，8月后灌溉量与降雨量减少，新源村沉陷速率趋于平缓，而党川村滑坡在10月后产生冻结滞水效应，沉陷有加剧的趋势。两种技术可为黑方台地区健康发展与灾害防治提供科学依据与参考。

关键词：Sentinel-1A；PS；SBAS；地表沉陷；黑方台
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0052-07

Subsidence Characteristics Analysis of Heifangtai Area Based on Sentinel-1A Data

ZHANG Hui[1], DANG Xinghai[1,2], LI Wangping[1], ZHAO Jianyun[3], JIA Liqi[4], ZHANG Xiuxia[1],
HAO Junming[1], ZHOU Zhaoye[1], FAN Xincheng[2]
(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Architectural Survey and Design Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
3. Department of Geologic Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;
4. School of Design Arts, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The plateau subsidence and tableland edge landslide were caused by long-term flood irrigation in Heifangtai of Yongjing, Gansu Province. In order to study the spatial distribution characteristics and causes of subsidence area, taking the Sentinel-1A images from September 2017 to November 2020 as data sources, we used PS and SBAS technologies to extract the surface subsidence information in the study area. Then, combining with irrigation, rainfall and temperature data, we selected the high coherence points D_1 and D_2 located in Xinyuan Village and Dangchuan Village, and cross-verified and analyzed the two sets of results. The results show that ①the subsidence areas identified by the two technologies are distributed equally in Xinyuan Village, Fangtai Village, Zhuwang Village, Chenjia Village and the surrounding area of tableland edge. The maximum annual average subsidence rates calculated by PS and SBAS in Xinyuan Village are 31.75 mm and 28.65 mm, respectively, and in Dangchuan Village are 32.6 mm and 28.4 mm, respectively. The spatial distribution and calculation results of two techniques are consistent. ②Due to the great temperature difference between Xinyuan Village and Dangchuan Village from February to March, both areas show a tendency of subsidence with the increase of temperature. From June to August, large-scale irrigation and increased rainfall lead to the subsidence of loess tableland edge and frequent landslides. After August, irrigation and rainfall decrease, the subsidence rate of Xinyuan Village tends to be flat, and the subsidence of Dangchuan Village has a tendency to intensify, which is closely related to the occurrence of landslide disaster in January 2021. These two technologies can provide scientific basis and reference for the healthy development and disaster prevention in Heifangtai.

Key words: Sentinel-1A, PS, SBAS, surface subsidence, Heifangtai

黄土是我国西北干旱、半干旱地区广泛分布的第四纪沉积物，包括碎屑矿物和黏土矿物，普遍具有发育良好的管状孔隙，在自重应力和附加应力共同作用下，浸水后土的结构被破坏，形成湿陷性黄土[1-2]，将对其上的建筑物造成一定的危害。甘肃省永靖县的黑方台地区属于典型的黄土台塬，长期大水漫灌导致台塬大面积沉

收稿日期：2021-08-27；修回日期：2021-12-09。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（51968042）。
第一作者简介：张辉（1997—），硕士研究生，研究方向为3S技术集成与应用，E-mail：1027042853@qq.com。

陷[3]，对当地人民生产生活造成严重威胁，为降低沉陷带来的安全隐患，需对黑方台地区的沉陷特征进行分析。传统地面测量手段以水准测量为主，由于监测范围小、成本高，已不能满足实际需求。合成孔径雷达（InSAR）是一种快速发展的遥感技术，通过SAR相位信息获得地表形变信息，可达到厘米级的监测精度，极大地提高了监测效率，但受空间和时间失相干影响严重。为减少该类误差带来的影响，赵富萌[4]等基于哨兵数据利用SBAS技术对中巴公路盖孜河谷地质灾害进行了早期识别，为地质灾害预警提供了科学依据；潘光永[5]等将SBAS技术应用于矿区沉降监测中，对矿区合理开采利用和灾害预防具有重要意义；王群[6]等将PS和Offset Tracking技术应用于滑坡中，可提前识别可能产生的滑坡体，为发生滑坡预警提供了有力依据；Novellino A[7]等将InSAR技术与机器学习相结合对滑坡进行风险评估，并取得了成效。因此，采用InSAR技术对黑方台地区进行地表沉陷监测，全面掌握黑方台地区地表沉陷变形的时空特征对早期滑坡识别十分重要。

本文以黑方台地区为研究区，利用PS和SBAS技术对黑方台地区2017年7月—2020年11月的38景Sentinel-1A数据进行处理分析；基于台塬与滑坡区域高相干性的同名点，利用两种技术进行交叉验证，并结合地表形变因素进行综合分析，以期为黑方台地区早期滑坡灾害识别与健康可持续发展提供数据支撑。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

黑方台地区位于甘肃省兰州市西北部，距兰州40 km，总占地面积为13.4 km^2，属黄河4级阶地；地处黄河北部、湟水河西部，地理范围为103°27′10″~103°33′86″E、36°08′14″~36°11′53″N，由于特殊的地理位置，使其成为一个孤立的台塬。以虎狼沟为中界线，东部为黑台，西部为方台，黑台地势西高东低，方台地势北高南低，年均气温为9.4 ℃，年均降雨量为281.2 mm。1986年水库淹没区的居民全部移居到黑方台，极大地促进了当地农业的迅速发展。引水灌溉工程的建立，实现了大规模灌溉。1984年以来，台地边缘发生了50多次滑坡[8]，山体滑坡的规模和频度不断增加，黑方台地区已成为甘肃省山体滑坡最严重、最频发的地区。研究区地层结构自上至下依次为黄土、粉质粘土、砂卵石和白垩系砂泥岩，台面高于周围河面100 m以上，地下水的补给来源主要为降雨和灌溉。大量灌溉水引起地下水位的上升，导致台塬沉陷与台塬周边滑坡的发生[9]。

1.2　实验数据

本文以覆盖研究区的38景Sentinel-1 A（数据源自http://www.esa.int/）以及相应的精密轨道数据为数据源，干涉模式和极化方式分别为宽幅干涉（IW）和垂直极化（VV），时间跨度为2017年9月—2020年11月，影像数据参数如表1所示。所用去除干涉地形相位的DEM来自ASF Earth Data网站（https://search.asf.alaska.edu/#/），分辨率为12.5 m。灌溉量、降雨量数据借鉴参考文献[10]，温度数据来源于历史天气网。

表1　Sentinel-1A影像数据参数

参数	Sentinel-1A
轨道方向	降轨
入射角	36.1°
波段	C
极化方式	同向极化
数量	38
时间	2017-09-16—2020-11-11

2　监测技术与数据处理

2.1　监测技术

2.1.1　PS-InSAR技术

PS技术通过计算长时间序列SAR影像中PS点在时间和空间域的形变量获取高精度形变信息[11-12]，克服了传统D-InSAR技术的失相干性、大气效应、残余高程导致的误差等缺点，是大规模地表变形监测的重要技术手段。利用PS的相位变化特征可获得时间序列上毫米级的形变信息[13]。

其基本思想为：对于同一研究区域的N幅SAR影像，根据时空基线与多普勒质心差分布最优的原则，选择一幅主影像，其余作为从影像，得到$N-1$个主从影像对，每个影像对通过配准和相干处理后生成N幅差分干涉图，对相位信息的振幅和相位信息进行计算分析，识别得到研究区范围内的任意景干涉图上的任一像元。差分干涉相位组成可表示为[14]：

$$\varphi_{\mathrm{int}}=\varphi_{\mathrm{defo}}+\Delta\varphi_{\varepsilon}+\Delta\varphi_{\mathrm{atm}}+\Delta\varphi_{\mathrm{orb}}+\varphi_{n} \tag{1}$$

式中，φ_{defo}为视线方向上的形变相位；$\Delta\varphi_{\varepsilon}$为DEM数据的相位残差；$\Delta\varphi_{\mathrm{atm}}$为大气扰动引起的干涉相位；$\Delta\varphi_{\mathrm{orb}}$为轨道误差引起的相位变化；$\varphi_{n}$为热噪声等其他因素对相位的影响。

PS技术对SAR数据的处理包括：①主影像的选择与主从影像配准；②影像对的连接图、干涉图生成；③提取PS点，并得到每个点在各差分干涉图中的差分干涉相位合集；④干涉图去平；⑤去除大气相位组成

成分；⑥解算得到PS点的三维位置信息、位置时间序列和平均位移速率[15-16]等。

2.1.2 SBAS-InSAR技术

SBAS技术的基本原理是以单次D-InSAR技术得到的形变结果为观测值，通过最小二乘法计算得到时间序列上高精度的形变信息[17-19]。D-InSAR技术由于时空基线过长会导致严重的失相干现象，为降低这种现象，SBAS技术在选择干涉影像对时，通过设置时空基线的阈值筛选来生成多视差分干涉图，再根据基线条件将这些干涉图分成若干组，通过最小二乘法计算各组的形变时间序列，然后采用奇异分解法对多个联合起来的小基线集求解，得到相应的时间序列形变信息。

SBAS技术对SAR数据的处理包括：①干涉像对的配对、干涉处理；②生成相干图、相位图和幅度图；③相干图阈值的选择，对相位进行解缠定标；④轨道精炼、重去平；⑤估算形变速率和高程系数；⑥去除大气、残余地形相位；⑦解算平均位移速率、位移时间序列和SDFP点三维信息。

PS与SBAS技术的处理流程如图1所示。

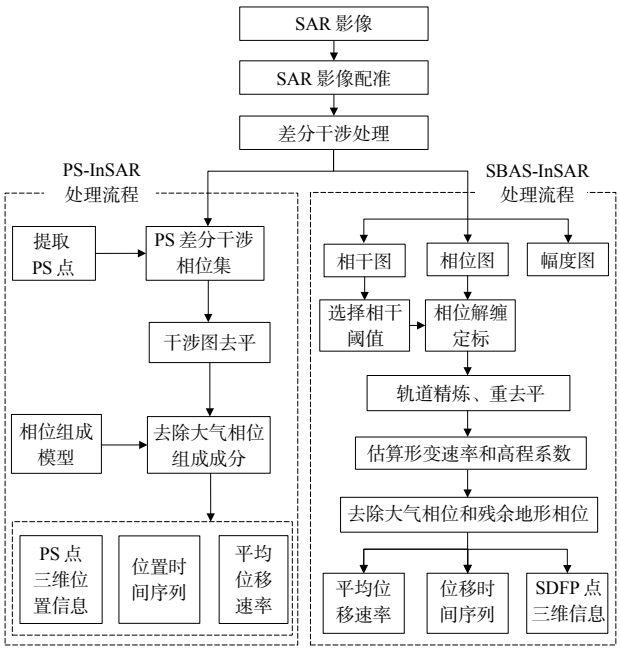


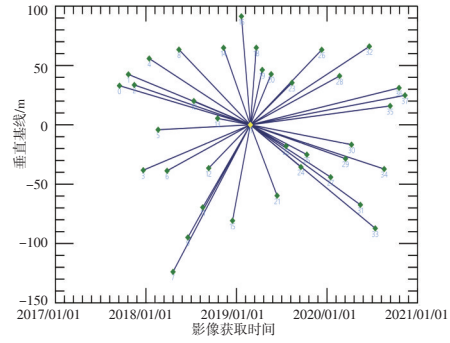
图1 PS与SBAS技术处理流程图

2.2 数据处理

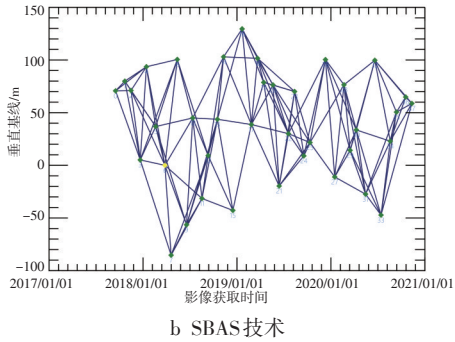
本文利用SARscape软件进行数据处理，再利用ArcGIS软件进行结果优化和沉陷速率制图，最后利用Origin软件进行时序分析。在生成干涉图前，先将原始数据导入软件并进行裁剪等预处理，裁剪范围约为南北方向5 km、东西方向8 km。数据处理的主要步骤包括空间基线连接、干涉图生成、第一次反演、第二次反演和地理编码等。

针对覆盖研究区的降轨哨兵影像，由于时间基线、空间基线、多普勒中心3个因素均会对公共主影像优化选取产生影响，因此PS技术以2019-02-26影像为主影像，其余37景影像为从影像，最长空间基线为123.877 m，最短空间基线为4.146 m，共组合37幅干涉像对，得到时空基线连接图（图2a）。为了减少失相干影像，主影像满足基线和最小的原则，SBAS技术以2018-03-27影像为主影像，由于黑方台地区多山、地形起伏较大，为避免时间和空间失相干的影响，经多次试验将最大临界基线阈值设置为2%，最大时间距离阈值设置为150 d，时间相位解缠采用Minimum Cost Flow方法，共生成129个干涉像对，最大临界基线为129.548 m，最小临界基线为5.134 m，得到时空基线连接图（图2b）。

生成连接图，主影像与从影像通过配准后，对于PS技术，相关系数、振幅离差指数等通过干涉相位计算；对于SBAS技术，通过Goldstein滤波法进行相位滤波，一次解缠采用Minimum Cost Flow干涉相位，通过外部DEM选择控制点、干涉图和相关系数图，控制点选取应远离变形区且满足稳定性较好等要求，为进一步除去平地相位和轨道误差，利用控制点对干涉图进行轨道精炼和重去平处理。在第一次反演估算形变速率和残余地形的同时，对干涉图进行优化；第二次反演时进行大气滤波，估算和去除大气相位，得到最终位移信息；最后把PS与SBAS技术处理的结果由SAR坐标系投影到外部DEM地理坐标系，以便后续沉降区域对比、分析与验证等。



a PS技术



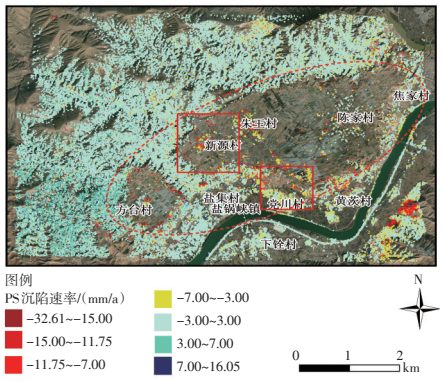
b SBAS技术

图2 PS和SBAS技术的时空基线连接图

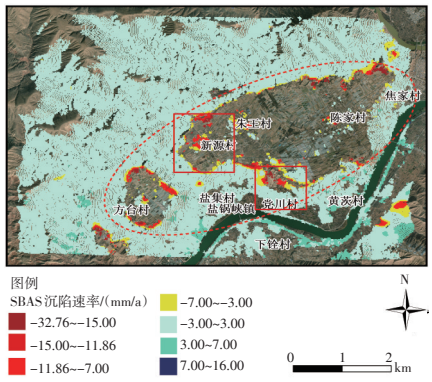
3　结果分析与精度验证

3.1　结果分析

Sentinel-1A影像经PS与SBAS技术处理后，将地理编码叠加于Google Earth上研究区LOS方向的形变速率如图3所示，可以看出，两种技术获取的沉陷区域地理位置分布情况高度一致，2017年9月—2020年11月PS和SBAS技术得到的年形变速率变化范围分别为−32.61～16.05 mm和−37.76～16.00 mm，两种技术得到的形变范围和量级均较吻合。为了定量分析PS和SBAS技术结果之间的差异，本文对相同区间内（虚线椭圆）的累积形变量进行统计，频数分布与拟合曲线如图4所示，可以看出，验证结果主要分布在−20～15 mm，不同的是SBAS技术获取的采样点数目多于PS技术，因此两种技术得到的形变结果均是可靠的。



a　PS技术



b　SBAS技术

图3　两种技术获取的黑方台研究区年均沉陷速率

由沉陷分布情况可知，黑方台多处区域不稳定，台塬区域存在不同程度的沉陷，严重区域主要集中在新源村与朱王村，方台村与陈家村也存在明显沉陷，其主要原因是大水漫灌引起地下水位上升、地基土强度降低，致使建筑地基湿陷；而新源村与朱王村的地下水埋深比台塬其他区域浅[20]，这可能是其沉陷严重的重要因素。另外，在台塬周边识别出党川村、方台村

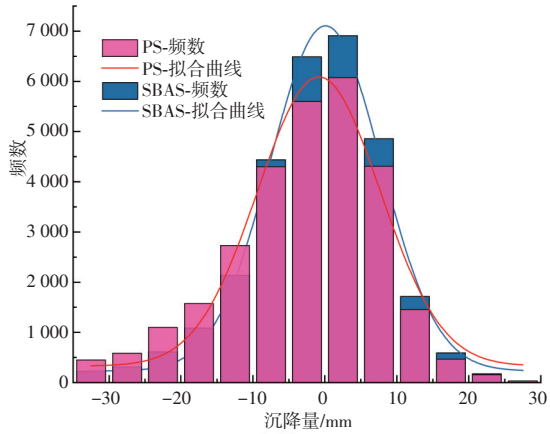
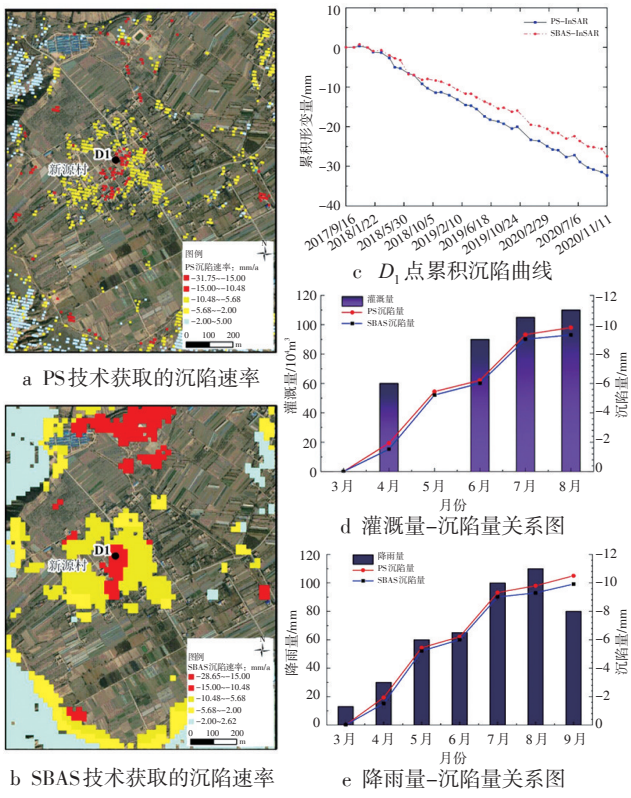


图4　PS与SBAS技术累积沉降量频数分布与拟合曲线统计图

等多个滑坡体，主要是由于黄土滑坡存在临界地下水位，当地下水位达到临界地下水位后便会诱发坡体失稳[20]、产生滑坡，党川村北侧台塬部分为长期灌溉的农田，因此滑坡较为严重。SBAS技术识别出黄河两岸有地表隆起现象，主要是由于中间水流速度比两侧快，泥沙不断在两岸沉淀形成的；PS技术由于算法不同在该处未选出足够的高相干点[21]。PS与SBAS技术分析的对象分别为高相干性的散射体点目标与分布式目标，对于存在沉陷的农田等其他区域表现为失相干性。为进一步探究PS与SBAS技术在研究区应用的可靠性，本文选取新源村台塬区域与党川村滑坡区域进行分析。

由图5a、5b可知，新源村沉陷较严重，周边滑坡体也存在不同程度的沉陷，两种技术得到的沉陷区域空间分布高度一致，PS与SBAS技术得到的年沉陷速率变化范围分别为−31.75～7.00 mm和−28.65～2.62 mm，两种技术解算的沉陷区域空间分布与沉陷速率变化范围均较吻合。该区域地层以黄土和粉质粘土为主[22]，在降雨或灌溉时，则会由于其自身湿陷而发生软化、陷落等，且持续时间较长。由于农业的快速发展和水利的新建，大量抽水灌溉导致地下水位的上升，使得黄土层中结构破坏、强度逐渐降低，在自重和附加应力的共同作用下引起台塬多处发生沉陷[23]。本文选取台塬区域相干性较高的相同经纬度同名点D_1，由两种技术得到的D_1点在时间序列上的累积变形曲线可知（图5c），PS技术得到累积沉陷量比SBAS技术多8 mm。由于灌溉时节主要集中在6—8月，本文利用PS和SBAS技术分析了D_1点2019年3—8月沉陷量与灌溉量的关系（图5d），可以发现，4月以前灌溉量较少，但地表仍出现沉陷，其原因主要与当地气温变化导致的冻融现象有关[10]；4月开始进入大面积灌溉期，PS与SBAS技术同名点所在区域开始发生明显

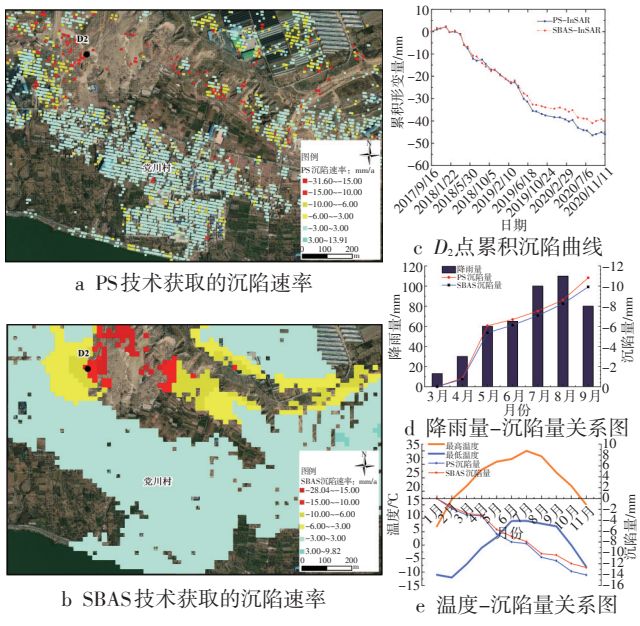


a PS技术获取的沉陷速率　c D_1点累积沉陷曲线

d 灌溉量–沉陷量关系图

b SBAS技术获取的沉陷速率　e 降雨量–沉陷量关系图

图5　新源村台塬区域结果



a PS技术获取的沉陷速率　c D_2点累积沉陷曲线

d 降雨量–沉陷量关系图

b SBAS技术获取的沉陷速率　e 温度–沉陷量关系图

图6　党川村滑坡区域结果

沉陷，6—8月达到沉陷变形的峰值，这是由于该处黄土具有较强的自重湿陷性，在历经几个月的大面积灌溉后，厚层黄土自重湿陷，地面出现大量陷穴、落水洞，沉陷裂缝等[24]，从而导致发生严重的沉陷灾害。由于降雨也会对黄土层造成影响，因此本文分析了降雨量对该区域沉降的影响（图5e），大面积灌溉时节也是降雨量最多的时候，降雨量的增多使原本发生湿陷的黄土愈加脆弱，3—9月PS和SBAS技术得到的累积沉陷量分别达到了10.8 mm和10 mm，沉陷趋势在8—9月逐渐变缓，该时期灌溉量减少，降雨量也非常有限。

由图6a、6b可知，PS与SBAS技术的年均沉陷速率分别达到了32.6 mm与28.04 mm，且沉陷区域均集中分布在滑坡区域，与长安大学研究团队1月预警滑坡灾害位置高度吻合（据报道:http://t.cn/A6cWJ4ca）。本文选取滑坡区域相干性较高的相同经纬度同名点D_2，由两种技术得到的D_2点在时间序列上的累积变形曲线可知（图6c），PS和SBAS技术分别到达了46 mm和40 mm，均呈持续沉陷趋势。由于长期大规模灌溉，台塬水位过于饱和，渗入边缘滑坡地区，使得滑坡土体软化，黑方台地区从20世纪60年代开始，每年发生3～6次滑坡[25]。除此之外，与滑坡有关的因素包括降水和温度，本文利用PS和SBAS技术分析了D_2点3—8月沉陷量与降雨量的关系（图6d），可以发现，4月开始降雨量逐渐增多，沉陷变形急剧增加，5月沉陷量将近60 mm，8月降雨量最多，9月沉陷量接近100 mm。

该地区冬季温度较低，常形成季节性冻土[25]，2—3月随着气温的回升开始解冻。通过分析2020年两种技术在D_2点处沉陷量与温度的关系（图6e）发现，由于2—3月当地灌溉量较少，而温差很大，土壤中的水经历融化、冰冻、再融化的循环过程，使土壤松散性加剧，诱发坡体失稳，滑坡体塬边出现沉陷趋势；而10月以后温度降低，产生冻结滞水效应，诱发坡体再次失稳，且有沉陷速率加剧的趋势[26]。

3.2　精度验证

两种技术获得的累计沉陷量趋势基本一致，从年均沉陷速率、沉陷点空间分布角度来看，两种数据处理方法具有较高的一致性。结合2017-09-16和2020-11-11的卫星影像图可以看出，新源村在D、E、F处发生了不同程度的沉陷变形（图7a、7b），E处位于台塬区域，沉陷最严重，D、F处位于台塬边缘，沉陷范围较小；党川村滑坡体在A、B、C处发生了明显变形（图7d、图7e），其中A处沉陷最严重，该处在2021年1月发生了严重的滑坡灾害。不论是新源村D_1点还是党川村D_2点，两种技术解算的数值均存在一定差异，PS技术得到的结果稍大于SBAS技术，有些沉降区域SBAS技术可以监测出来，而PS技术由于无法选出足够的PS点不能监测出来（图7a中D区域与图7d中B区域），两种技术算法不同，得到的结果有略微差别[21]。

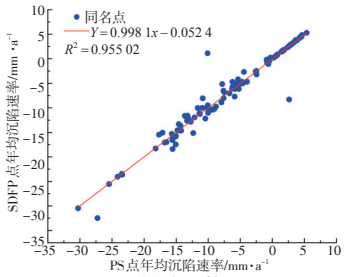
由于本次研究区域缺少同期外部水准等数据的对应，本文采用两种技术交叉验证以及与已发表文献结



a 2017-09-16新源村卫星影像



b 2020-11-11新源村卫星影像



c 相关系数图



d 2017-09-16党川村滑坡体卫星影像



e 2020-11-11党川村滑坡体卫星影像

图7　交叉验证结果

果进行对比两种方式验证获取结果的精度。将同名点的年均沉陷速率作为分析对象，共选取236个同名点，以PS点沉陷速率为横轴，SDFP（SBAS）沉陷速率为纵轴，绘制年均相干系数图（图7c），可以看出，相关系数为0.998 1，R^2为0.955 02，证明两种技术监测结果的可靠性较高。

由于前人对黑方台地区的研究较丰富，考虑到研究区的数据类型和时间段，本文将得到的结果与前人结果进行对比，以验证两种技术的精度。曾珠[27]研究得到的黑方台党川村滑坡区域LOS向最大年均沉陷速率为20.8 mm，本文PS技术解算的党川村滑坡区域最大年均沉陷速率为32.6 mm，SBAS技术解算的结果为28.04 mm，因此SBAS技术解算的结果与前人得到的结果较接近，且SBAS技术提取的沉陷点数量多于PS技术，因此SBAS技术精度更高，适用性更强。

4　结　语

本文基于38景Sentinel-1A数据，利用PS与SBAS技术获得黑方台地区地表沉陷的空间分布情况；选取新源村与党川村高相干点D_1、D_2，结合灌溉、降雨、温度数据对两种结果进行交叉验证与分析，得到的结论为：

1）PS与SBAS技术识别的沉陷区域均分布于新源村、方台村、朱王村、陈家村以及台塬周边，两种技术在新源村解算得到最大年均沉降速率分别为31.75 mm和28.65 mm，在党川村分别为32.6 mm和28.4 mm，两种技术在空间分布和解算结果上的一致性较高。对比已有文献发现，SBAS技术应用于该地区的精度更高，适用性更强。两种技术可为黑方台地区健康发展与灾害防治提供科学依据与参考。

2）新源村与党川村滑坡累积沉陷量逐年递增，由于2—3月温差很大，随着温度的上升冻土逐渐解冻，两个区域都出现沉陷趋势；4月进入灌溉期，黄土台塬由于地下水位上升、土体强度降低，两个区域沉陷量同时开始加剧；6—8月在大面积灌溉与大量降雨的共同作用下，两个区域沉陷严重；8月以后灌溉量和降雨较少，新源村沉陷速率趋于平缓；党川村滑坡区域在10月以后产生冻结滞水效应，沉陷有加剧趋势。

参考文献

[1] 毛佳睿,武雄. 山西省黄土崩塌影响因素及时空分布特征[J]. 科学技术与工程,2020,20(10):3 799-3 807

[2] 康海伟,李萍,侯晓坤,等. 原状黄土土水特征滞后性研究[J]. 水文地质工程地质,2020,47(2):76-83

[3] 魏丽娟. 黑方台黄土滑坡成因与滑距分析[D]. 兰州:兰州大学,2012

[4] 赵富萌,张毅,孟兴民,等. 基于小基线集雷达干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别[J]. 水文地质工程地质,2020,47(1):142-152

[5] 潘光永,陶秋香,陈洋,等. 基于SBAS-InSAR的山东济阳矿区沉降监测与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):100-106

[6] 王群,张蕴灵,范景辉,等. 基于PS-InSAR和offset tracking技术的金沙江白格滑坡形变监测[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(4):340-345

[7] Novellino A, Cesarano M, Cappelletti P, et al. Slow-moving Landslide Risk Assessment Combining Machine Learning and InSAR Techniques[J]. Catena,2021,203:236-241

[8] 杨柳. 黑方台台塬灌溉水流量与黄土滑坡群的关系分析[J]. 地球,2013(9):212,221

[9] 潘攀. 黑方台滑坡机理及防治对策研究[D]. 杭州:浙江大学,2017

[10] 沈佳广. 时序InSAR监测黑方台地区典型地质灾害形变及分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019

[11] 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):2 202

[12] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos[M]. John Wiley & Sons, Inc. ,2007

[13] 李德仁,廖明生,王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):664-668

[14] 黄佳璇. 基于PSInSAR蠕动型滑坡动态监测及区域稳定性分析[D]. 北京:北京科技大学,2017

[15] 赵强. 基于InSAR时序分析的吉林省地表形变监测研究[D]. 长春:吉林大学,2019

[16] 朱玉. 基于PS-InSAR的贵州省大方县、纳雍县滑坡易发性评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020

[17] 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): 2 375-2 383

[18] Usai S, Klees R. SAR Interferometry on a very Long Time Scale: A Study of the Interferometric Characteristics of Man-made Features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1999,37(4):2 118-2 123

[19] Usai S. A New Approach for Longterm Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry[D]. Netherland: Delft University Press,2001

[20] 任晓虎. 基于多指标的甘肃黑方台黄土滑坡早期识别研究[D]. 成都:成都理工大学,2020

[21] 刘欣,商安荣,贾勇帅,等. PS-InSAR和SBAS-InSAR在城市地表沉降监测中的应用对比[J]. 全球定位系统,2016,41(2):101-105

[22] 朱文峰. 甘肃黑方台黄土滑坡InSAR精细化识别与监测[D]. 西安:长安大学,2018

[23] 戎娟. 地下水位上升引起湿陷性黄土地基沉降模拟研究[D]. 西安:长安大学,2020

[24] 文宝萍,余志山,黎志恒,等. 灌溉作用下甘肃永靖黑方台地面沉陷趋势分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):108-114

[25] 吴玮江,叶伟林,姚正学,等. 甘肃永靖黑方台4·29罗家坡黄土滑坡的特征[J]. 冰川冻土,2016,38(3):662-670

[26] 李广,张明礼,叶伟林,等. 甘肃黑方台坡面冻融特征及冻结滞水效应分析[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(6):117-122

[27] 曾珠. 基于InSAR技术分析甘肃黑方台已滑及潜在滑坡区地表形变[D]. 成都:电子科技大学,2019

(上接第43页)

资料，给出判定结果，对于采取动工开发方式的闲置土地，若核查过程中无法根据影像判断是否开工，则采取项目开工监管中外业举证的方式进行现场核查判断。

4 结 语

“亩产论英雄”可从源头上止住新增闲置浪费，加快已有闲置的处置消化。本文探讨了土地利用动态巡查监管的应用方法，综合利用3S技术手段，充分发挥影像数据多分辨率高频次更新的优势，统一管理数据，详细介绍了净地供应审查、项目开工监管、闲置土地处置监管的流程。在流程监管中，通过持续的跟踪更新，有效监督各宗地项目的真实情况，解决传统监管技术时效与覆盖面的问题。下一步将根据本文设计的监管流程方法进行系统设计开发，以提升工作效率，实现土地利用问题的快速发现和提取。

参考文献

[1] 湖北省人民政府. 湖北省实施“亩产论英雄”改革[EB/OL]. (2021-06-16) [2022-09-21]. http://www. hubei. gov. cn/zwgk/hbyw/hbywqb/202106/t20210616_3596244. shtml

[2] 湖北省人民政府. 2019年全省国有建设用地供应及供后开发利用监测监管情况[EB/OL]. (2020-06-08) [2022-09-21]. http://zrzyt. hubei. gov. cn/fbjd/xxgkml/sjfb/tdzytjsj/202006/t20200608_2384505. shtml

[3] 湖北省人民政府. 图解数据:2021年1-6月建设用地审批情况 [EB/OL]. (2021-10-21) [2022-09-21]. http://zrzyt. hubei. gov. cn/fbjd/xxgkml/sjfb/tdzytjsj/202110/t20211021_3820173. shtml

[4] 湖北省人民政府. 图解数据:2021年1-6月建设用地供应情况 [EB/OL]. (2021-10-21) [2022-09-21]. http://zrzyt. hubei. gov. cn/fbjd/xxgkml/sjfb/tdzytjsj/202110/t20211021_3820184. shtml

[5] 胡海燕. 基于卫星影像的自然资源疑似违法行为监测[J]. 地理空间信息,2021,19(2):17-21

[6] 谭耀华,王长委. 国产高分辨率遥感数据在城市森林资源监测中的应用[J]. 测绘通报,2019(5):113-115

[7] 黎刚. 测绘支撑自然资源督察工作的若干思考与探索[J]. 地理空间信息,2020,18(10):129-130

[8] 苟佳. 土地资源节约集约利用对策建议[J]. 当代县域经济,2021(10):76-77

[9] 韩波. 关于做好国有建设用地供后监管以促土地资源节约集约利用的思考[J]. 农村实用技术,2019(8):110