引文格式：李智一,薛东剑,张军元,等. 利用时序 InSAR 技术的乌鲁木齐市地面沉降监测与分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):32-36. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.007

利用时序 InSAR 技术的乌鲁木齐市地面沉降监测与分析

李智一[1]，薛东剑[2,3*]，张军元[2]，陈雨琪[2]，闫　琦[2]
（1. 成都理工大学地球与行星科学学院，四川 成都 610059；
2. 成都理工大学地理与规划学院，四川 成都 610059；
3. 成都理工大学科技考古研究中心，四川 成都 610059）

摘　要：乌鲁木齐市位于准噶尔盆地南缘，是中国西北地区的重要中心城市。由于当地矿区众多和城市建设频繁的原因，极易发生地面沉降，从而对生态环境、财产安全、人民生活造成危害。选取2023年1月6日—2024年1月25日的32景Sentinel-1A数据为研究数据，利用时序InSAR技术获取了乌鲁木齐市城区及周边地区的地面沉降监测数据。结果表明，显著的沉降区域主要分布在城市周边矿区和大面积扩建的乌鲁木齐国际机场。其中，乌鲁木齐国际机场的雷达视线向年平均形变速率达到了104 mm·a^{-1}，位于米东区和水磨沟区最大的三处沉降区雷达视线向年平均形变速率分别达到了125 mm·a^{-1}、117 mm·a^{-1}和110 mm·a^{-1}，位于沙依巴克区的沉降区雷达视线向年平均形变速率达到了42 mm·a^{-1}。结合沉降区域卫星影像图和相关资料进行分析，机场跑道扩建和T4航站楼施工是乌鲁木齐国际机场沉降的主要原因，资源开采是乌鲁木齐市城区周边地区沉降的主要原因。

关键词：Sentinel-1A；SBAS-InSAR；乌鲁木齐市；沉降监测
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0032-05

Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Urumqi City Based on Time-series InSAR Technology

LI Zhiyi[1], XUE Dongjian[2,3], ZHANG Junyuan[2], CHEN Yuqi[2], YAN Qi[2]
(1. School of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. School of Geography and Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
3. Center for Scientific and Technological Archaeology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Urumqi is located at the southern edge of the Junggar Basin and is an important center city in northwest China. Due to the numerous local mines and frequent urban construction, it is highly susceptible to surface subsidence thus causing harm to the ecological environment, property safety, and people's life. Taking the 32 views Sentinel-1A data from January 6, 2023 to January 25, 2024 as the study data, we used the time-series InSAR technique to obtain the surface subsidence monitoring data in the urban area of Urumqi and its surrounding areas. The results show that the subsidence areas are mainly distributed in the mining areas around the city and the Urumqi International Airport, which is under expansion. Among them, the radar line-of-sight deformation rate of the Urumqi International Airport reaches 104 mm/a, the three largest subsidence areas in Midong and Shuimogou districts reach 125 mm/a, 117 mm/a, and 110 mm/a, respectively, and the radar line-of-sight deformation rate of subsidence areas in Shayibak District reaches 42 mm/a. Analyzing the satellite image maps of subsidence area and related data, we found that the expansion of airport runway and the construction of T4 terminal were the main reasons for the subsidence of the Urumqi International Airport, and resource exploitation is the main reason for the subsidence of urban areas around Urumqi City.

Key words: Sentinel-1A, SBAS-InSAR, Urumqi, subsidence monitoring

地面沉降是一种由人类活动和地质作用引起地面标高缓慢降低的环境地质现象[1]，因其累进性的缓慢形变而不容易被发觉[2]，但是一旦形成便会对生态环境，财产安全，人民生活造成巨大的危害，因此对于地面沉降的监测工作极为重要。

近年来，国内外学者已将SBAS-InSAR技术广泛应用于地面沉降的监测工作[3]。周小龙等[4]使用SBAS-InSAR技术对平川矿区的沉降进行了监测与分析；Giorgini等[5]使用SBAS-InSAR对智利康塞普西翁市进行了地表监测和成因分析；杨利等[6]采用SBAS-InSAR技术对五龙沟矿区的地表形变进行监测和时序分析。关于乌鲁木齐市的地面沉降也有不少学者使用SBAS-InSAR技术进行了监测。Yang等[7]使用SBAS-InSAR技术提取到了乌鲁木齐地铁1号线的沉降速率并对

项目来源：第三次新疆综合科学考察项目（2023xjkk0103）。
第一作者简介：李智一（2001—），硕士，研究方向为雷达干涉测量，E-mail：783103847@qq.com。
通信作者：薛东剑（1977—），博士，副教授，研究方向为雷达干涉测量及地质灾害评价，E-mail：xuedongjian10@cdut.cn。

风险源进行了调查；李倩文等[8]基于SBAS-InSAR对2019—2021年的苇湖梁矿区工作面位置进行监测，结果显示该地表现出明显的地面塌陷形变。

乌鲁木齐市内矿产资源丰富矿区众多[9-10]且城区建设快速[11-12]，导致该地区极易发生地面沉降。为了解乌鲁木齐市的地面沉降情况以减少财产损失和对生命安全的危害，本文以乌鲁木齐市为研究对象，采用SBAS-InSAR技术对研究区地面沉降进行监测。在此基础上结合google earth卫星影像图，矿产开采、工程建设等资料，分析了地面沉降的空间分布特征和沉降成因。

1　研究区概况与数据源

1.1　研究区概况

乌鲁木齐市位于天山山脉中段北麓、准噶尔盆地南缘。属中温带大陆性干旱气候，降水量较小导致地下水用量较大，抽取大量的地下水则会导致地面沉降。该地区发育地层有古生界泥盆、石炭、二叠系，中生界三叠、侏罗、白垩系和新生界古近系、新近系以及第四系[13]，其中侏罗系三叠系地层富含煤矿，这使得该市的煤矿资源丰富，而煤矿采空区又会导致地面沉降甚至塌陷，如位于该市东北部的铁厂沟煤矿在2017年发生的塌陷事故就造成了多人死亡的严重后果[14]，因此对市内矿区的沉降监测至关重要。此外，该市在春季的融雪水会软化泥岩和砂质泥岩，往往会在第四系覆盖层内部和基覆界面发生变形滑动从而引发滑坡[15]。如图1所示，本文研究区域包含了头屯河区、新市区、米东区、水磨沟区、达坂城区、天山区、沙依巴克区和乌鲁木齐县，图中蓝色框线为本文研究区范围。



图1　研究区地理位置示意图

审图号：GS(2024)0650号

1.2　实验数据来源

本文数据来源为欧空局Sentinel-1A卫星2023年1月6日—2024年1月25日C波段32景升轨数据，极化方式为VV极化，成像模式为宽干涉（IW）模式，分辨率为5 m×20 m。为提高实验精度，使用了Sentinel-1A卫星的精密轨道数据以校正轨道造成的误差，提高形变相位精度。同时使用了30 m分辨率的SRTM数据来作为外部DEM数据。

2　SBAS-InSAR技术

2.1　技术原理

Berardino等[16]于2002年提出的SBAS-InSAR技术，通过选择合适的空间与时间阈值来构成干涉对，并选取相干目标点利用线性相位变化模型进行建模与解算，通过时空滤波去除大气延迟，在减少各种误差的同时获取地表的形变时间序列，该技术增加了时间采样频率，在获取形变序列图时有更好的连续性。SBAS-InSAR技术的流程如图2所示。

在SBAS-InSAR测量中，选取主影像进行配准后，在差分干涉对中选取符合时空基线阈值的干涉对，若有 M 幅差分干涉对，则有：

$$\frac{N}{2}\leqslant M\leqslant (N-1)\frac{N}{2} \tag{1}$$

然后对生成的多视差分干涉图进行滤波和解缠处理，对 t_A 和 $t_B(t_A<t_B)$ 时刻两幅影像生成的第 i 幅干涉图，坐标为 (x,r) 的像素相位值可表示为：

$$\begin{aligned}\delta\phi_i(x,r)=&\phi(t_B,x,r)-\phi(t_A,x,r)\approx\\&\left[\phi_d(t_B,x,r)-\phi_d(t_A,x,r)\right]+\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp\Delta z}{r\sin\theta}+\\&\left[\phi_{\text{atm}}(t_B,x,r)-\phi_{\text{atm}}(t_A,x,r)\right]+\Delta n_i(x,r)\end{aligned} \tag{2}$$

式中，(x,r) 为像素点的影像坐标；$\phi(t,x,r)$ 为SAR影像上的相位值；$\phi_d(t_A,x,r)$ 和 $\phi_d(t_B,x,r)$ 分别为时间 t_A 和 t_B 相对参考时间 t_0 在雷达视线方向上的累积形变相位量；$B_\perp$ 为垂直基线长；Δz 为DEM误差；$\phi_{\text{atm}}(t_B,x,r)$ 和 $\phi_{\text{atm}}(t_A,x,r)$ 为两幅影像中大气延迟引起的相位部分；$\Delta n_i(x,r)$ 为由失相关引起的噪声相位；r 和 θ 分别为视线向斜距和入射角；λ 为雷达波长。

去除大气误差和地形误差后，公式（2）可变为：

$$\varphi\delta(x,r)=\boldsymbol{B}\varphi(x,r) \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{B}$ 为 $M\times N$ 的维矩阵；M 对应每一幅干涉图；N 对应每一景雷达影像。矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为近似关联矩阵，若 $M=N$ 时，方程组有唯一解；若 $M>N$ 时，方程组没有确定解，则可以用最小二乘法求得 $\varphi(x,r)$ 的估计值，如公式（4）：

$$\hat{\varphi}(x,r)=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\varphi\delta(x,r) \tag{4}$$

若基线集含有多个子集，矩阵 $\boldsymbol{A}$ 秩亏，$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{A}$ 为奇异矩阵，此时方程解有无限多个，能解出唯一解的一个较常用方法为奇异值分解法。

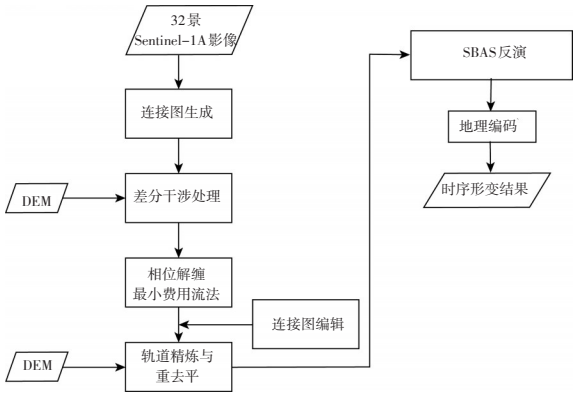


图2 SBAS-InSAR技术流程图

2.2 处理过程

本文使用ENVI SARscape进行数据处理，流程如下：

1）数据预处理：将Sentinel-1A原始数据在加入精密轨道文件后通过SARscape导入，并裁剪出实验区域。

2）生成连接图：设置最大时间基线阈值为180 d，空间基线阈值为45%后，生成了129对干涉对。

3）干涉处理：对上一步生成的干涉对进行干涉处理，处理包括相干性生成、去平、滤波和相位解缠。本实验解缠采用的方法为Minimum Cost Flow，解缠相关系数阈值为0.2，滤波方法为Goldstein。对处理结果进行筛查，剔除相干性低的干涉对后剩余128对干涉对。

4）轨道精炼及重去平：估算和去除残余的恒定相位和相位坡道。本实验选取了32个GCP点，在添加参考DEM后进行处理。

5）SBAS反演：第一次反演是对解缠后的相位进行优化和重去平、估算形变速率和残余地形、二次解缠。第一次反演设置相关性阈值为0.2，解缠相干系数为0.2，形变模型选择线性模型。第二次反演是在第一步基础上，进行相位优化和重去平、大气滤波、估算和去除大气相位，得到更加精确的时间序列上的最终位移结果。第二次反演的相干性阈值设置为0.3，轨道精炼方法选择Polynomial Refinement。

6）地理编码：将结果进行地理编码并制图。

3 精度验证及监测结果分析

3.1 精度验证

为验证本实验结果的可靠性，本文采用了SBAS-InSAR技术和PS-InSAR技术处理的结果进行比较验证。用2种技术得到的沉降速率作为分析对象，共选取了538个同名点，将其对应的沉降速率进行相关性分析。如图3所示，相关系数为0.931 7，证明2种监测结果具有较强的一致性，验证了监测结果的可靠性。

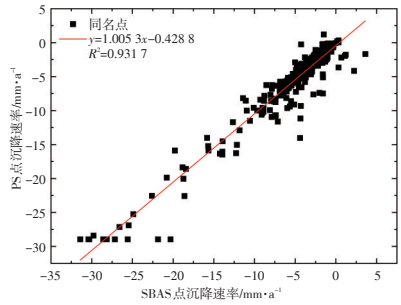


图3 研究区地表形变速率图

3.2 沉降成因分析

研究区内沉降速率分布如图4所示，从图中可以看出，乌鲁木齐市城区只有工程建设导致的小面积沉降，沉降速率都在25 mm.a^{-1}以内。而周边地区却分布了多处大型沉降区域，其主要分布在米东区南部、水磨沟区西部、沙依巴克区北部、天山区中部和新市区西部。

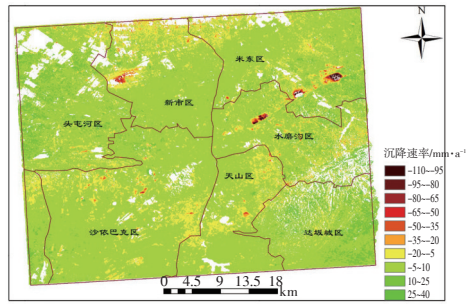


图4 研究区地表形变速率图

审图号：GS京(2022)1061号

结合SBAS-InSAR处理结果和google earth卫星影像图可知，米东区、水磨沟区、沙依巴克区和天山区的矿区较多，该区的沉降可能与矿区的开采有关。位于新市区的沉降则是乌鲁木齐国际机场所在地，该区域的沉降原因可能与机场大面积建设有关。

为进一步了解研究区内的沉降情况，本文选取了5处具有代表性的沉降区域进行分析。如图5所示是位于乌鲁木齐市东北部米东区和水磨沟区三处较大的沉降区域，乌鲁木齐市东北部分布着许多矿区如碱沟煤矿、铁厂沟煤矿、大洪沟煤矿、小红沟煤矿、苇湖梁煤矿和六道湾煤矿等，这些煤矿区域广并彼此相连最终形成了横跨水磨沟区和米东区的煤矿带。由图5可以看出沉降区A内最大沉降速率达到了125 mm·a^{-1}，中间区域有干涉失相干可能是由较大的形变引发的失相干现象。如图6的累计形变所示，沉降区A内重点监测点P1在2023年1月—2024年1月间的累计形变量为-125 mm。沉降区B内最大沉降速率达到了117 mm·a^{-1}，区内重点监测点P2在2023年1月—2024年1月间的累计形变量为-107 mm。沉降区C内最大沉降速率达到了110 mm·a^{-1}，区内重点监测点P3在2023年1月-2024年1月间的累计

形变量为−106 mm。结合光学影像和前人成果[17]显示区域A位于原苇湖梁煤矿、区域B位于原碱沟煤矿、区域C位于原大洪沟煤矿。如今区域A、B和C所在的煤矿已合并称为乌东煤矿，乌东煤矿属于井工矿，即通过井筒及地下巷道进行采煤的矿井。因此，区域A、B和C沉降的原因极有可能是煤矿资源开采导致的地下形成空洞引起的地面沉陷，需要相关部门引起重视。

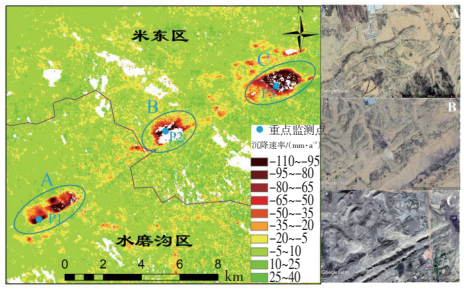


图5　区域A–C沉降速率图与光学影像

矢量图审图号：GS京(2022)1061号

影像图审图号：GS(2011)6020号

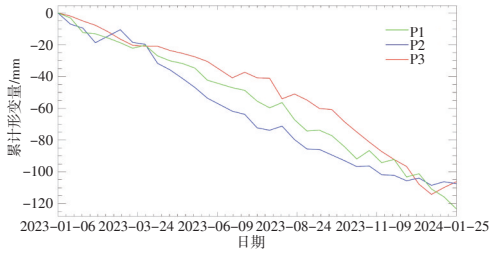


图6　重点监测点P1–P3累计形变图

如图7所示，区域D是位于沙依巴克区北部的一处沉降区，最大的沉降速率达到42 mm.a^{-1}，图8所示的重点监测点P4在2023年1月—2024年1月间的累计形变量达到了−37 mm，根据光学影像显示沙依巴克区北部建有很多采沙场，区域D所在区域名为桃源沙场，该沙场以采沙石黏土为主，因此该地区沉降的原因最有可能是过度开采导致紧密的沙土结构变得松散，失去了原有的支撑力，从而导致地面沉降。沙依巴克区其他沉降区也都位于各种大小不同的采沙场，同样可能是因为过度开采而导致沉降。

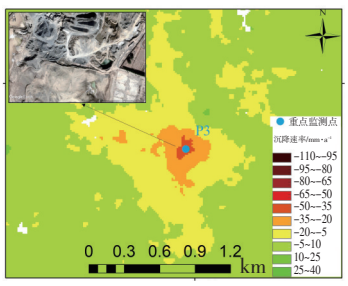


图7　区域D地表沉降速率图与光学影像

审图号：GS(2011)6020号

区域E乌鲁木齐国际机场位于新市区，自2019年

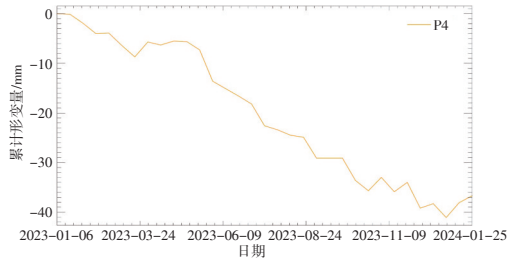


图8　重点监测点P4累计形变图

开始的扩建[18]可能是机场沉降的主要原因。图9是机场的地表沉降速率图，机场内最大的沉降速率达到了104 mm.a^{-1}，图10为重点监测点P5点的累计形变图，该点在2023年1月—2024年1月的累计形变量达到了−78 mm，且在2023年7月之后沉降速率加快，结合2023—2024年机场光学影像和相关报道[19]，点P5位于机场内的T4航站楼，该楼在2023年7月后开始内部修建最有可能是导致沉降在同时期速率加快的原因。

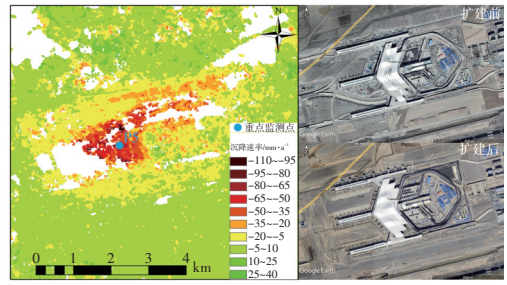


图9　区域E乌鲁木齐国际机场地表沉降速率图与光学影像

审图号：GS(2011)6020号

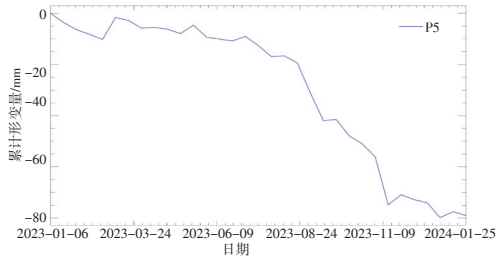


图10　重点监测点P5累计形变图

4　结　论

本文利用SBAS–InSAR技术处理了2023年1月6日—2024年1月25日的32景Sentinel–1A数据，提取了乌鲁木齐市的地面沉降信息并结合PS–InSAR技术监测到的结果验证了实验结果的可靠性，在对沉降区域的空间分布和成因进行了分析后，得出的主要结论如下：

1）研究区内米东区南部、水磨沟区西部、沙依巴克区北部、天山区中部和新市区西部都存在地面沉降。位于米东区南部、水磨沟区西部和新市区西部的沉降最为严重。

2）结合累计形变量监测图对研究区内的5个沉降区

域进行研究。结果表明，位于米东区和水磨沟区三处沉降区域A、B、C的最大沉降速率分别达到了125 mm·a^{-1}、117 mm·a^{-1}和110 mm·a^{-1}，3个沉降区的重点监测点P1、P2和P3累计形变量分别是–125 mm、–107 mm和–106 mm；位于沙依巴克区北部的D区域最大沉降速率达到了42 mm·a^{-1}，区内重点监测点P4累计形变量达到了–37 mm；位于新市区的乌鲁木齐国际机场最大沉降速率达到了104 mm·a^{-1}，位于T4航站楼的重点监测点P5在7月开始加速沉降，该点累计形变量达到了–78 mm；

3）结合google earth卫星影像图和相关资料进行成因分析。结果表明，乌鲁木齐市内发生沉降的主要原因是煤矿和砂石资源的开采和工程建设。沉降区A、B和C的沉降最有可能是由于乌东煤矿的煤矿资源开采导致地下形成空洞引起的地面沉陷；沉降区D的沉降和采沙场过度开采导致紧密的沙土结构变得松散，失去了原有的支撑力；沉降区E的沉降和机场扩建有密切关系。

参考文献

[1] 薛禹群，张云，叶淑君，等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究，2003,45(6):585-593

[2] 殷跃平,张作辰,张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,15(2):1-8

[3] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. Journal of Geophysical Research,1989,94: 9 183- 9 191

[4] 周小龙,石鹏卿,张娟,等. 基于SBAS-InSAR技术的平川矿区形变监测与分析[J]. 地理空间信息,2024,22(6):53-56

[5] Giorgini E, Orellana F, Arratia C, et al. InSAR Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Small Baseline Subset (SBAS) Techniques for Ground Deformation Measurement in Metropolitan Area of Concepción, Chile[J]. Remote Sensing,2023,15(24):5 700

[6] 杨利，薛东剑，王海方，等. 五龙沟矿区时序InSAR地表形变监测[J]. 中国矿业,2021,30(3):107-112

[7] Yuan Y, Qin Y, Zhang Y, et al. Environmental Risk Source Analysis and Classification of Zones: Subway Construction[J]. Applied Sciences,2023,13(10):5 831

[8] 李倩文，鲜全，童锋，等. 基于SBAS-InSAR技术的M宗地采空区遥感解译[J]. 能源与环保,2023,45(8):129-136

[9] 卞正富，张益东，王猛，等. 新疆煤炭资源开发潜力与开发策略[J]. 煤炭学报,2024,49(2):967-977

[10] 杨天鸿,孙东东,胥孝川,等. 新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(1):1-12

[11] 周满意，王承武. 基于PLUS模型的乌鲁木齐市“三生”空间多情景模拟[J]. 中国环境科学,2024,44(7):4 021-4 030

[12] 姜展鹏，包安明，李艳红. 基于GeoSOS-FLUS模型的乌鲁木齐主城区扩张情景模拟分析[J]. 遥感技术与应用,2023,38(2):332-340

[13] 余会明，曹琛，夏平，等. 新疆乌鲁木齐市地质灾害特征分析及防治措施建议[J]. 地质灾害与环境保护,2017,28(1): 20-24

[14] 梅军军，徐素宁，彭令，等. 国产高分卫星数据在新疆铁厂沟煤矿塌陷调查中的应用[J]. 国土资源遥感,2017,29(增刊): 132-136

[15] 陈德斌，付晶，韩庆洋，等. 新疆地质灾害防治成效、挑战与对策[J]. 工程地质学报,2023,31(4):1 145-1 155

[16] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Agorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Unterferograms[J]. IEEE Trans, Geosci, Remote. Sens,2002,40:2 375-2 383

[17] 冯健，杨早早，徐莹，等. 乌鲁木齐市采煤塌陷区地表沉降遥感监测[J]. 全球定位系统,2023,48(3):44-51

[18] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于乌鲁木齐机场改扩建工程可行性研究报告的批复[R].中华人民共和国中央人民政府, 2018

[19] 王祎. 新疆乌鲁木齐机场改扩建项目地面主体工程基本完工 中新网[EB/OL]. (2023-07-14)[2024-08-29]. https://www.chinanews. com. cn/tp/hd2011/2023/07-14/1071973.shtml

（上接第31页）

tial Sci,2010,16 (1):55-66

[9] Guzy A, Malinowska A A. State of the Art and Recent Advancements in the Modelling of Land Subsidence Induced by Groundwater Withdrawal [J]. Water,2020,12(7):2 051

[10] Lacroix P, Handwerger A L, Bièvre G. Life and Death of Slow-moving Landslides [J]. Nat Rev Earth Environ, 2020,10(1):404-419

[11] Yang Z, Li Z, Zhu J, et al. Use of SAR/InSAR in Mining Deformation Monitoring, Parameter Inversion, and Forward Predictions: A Review [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine,2020,8(1):71-90

[12] Wang Q, Gao Y, Gong T, et al. Dam Surface Deformation Monitoring and Analysis Based on PS-InSAR Technology: A Case Study of Xiaolangdi Reservoir Dam in China [J].Water, 2023,15:3 298

[13] Dong J, Lai S N, Wang Y. et al. Multi-scale Deformation Monitoring with Sentinel-1 InSAR Analysis Along the Middle Route of the South-North Water Diversion Project in China [J].Int. J Appl Earth Obs Geoinf,2021,100:102 324

[14] 张超伟，刘运才，左世诚，等. 利用时序InSAR技术开展大型调水工程变形监测[J]. 地理空间信息，2024，22(7):76-79