



引文格式:盖侨侨,孙倩,张宁,等.融合时序InSAR形变的白银市地质灾害易发性评价[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1434-1443.DOI:10.13203/j.whugis20220192

Citation: GE Qiaqiao, SUN Qian, ZHANG Ning, et al. Evaluation of Geological Hazard Susceptibility of Baiyin City Based on Multi-temporal InSAR Deformation Measurements[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8): 1434-1443. DOI: 10.13203/j.whugis20220192

融合时序InSAR形变的白银市地质灾害 易发性评价

盖侨侨^{1,5} 孙倩² 张宁^{3,4} 胡俊¹

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙,410083

2 湖南师范大学地理科学学院,湖南长沙,410081

3 中国科学院地理科学与资源研究所,北京,100101

4 中国城市规划设计研究院(住房和城乡建设部遥感应用中心),北京,100835

5 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司,广东广州,510000

摘要:现有地质灾害点/隐患点记录作为地质灾害评价的数据基础,存在时效性差、不全面的问题,而时序合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术能高时空分辨率地监测大范围地表形变。因此,如何将时序InSAR获取的形变信息融入地质灾害评价模型,已经成为地质灾害评价领域的研究热点之一。首先将时序InSAR监测得到的形变点代替现有地质灾害记录点,同时将其形变量级作为一个评价因子融入易发性评价模型,充分利用了时序InSAR获取的形变有效信息;然后采用耦合信息量和层次分析法模型,对中国甘肃省白银市进行地质灾害易发性评价及分区。通过已有地质灾害点数据的验证发现,在划定的极高易发区,10 km²内已有地质灾害点数可达近8个,而极低易发区内的点数不足1个,表明利用所提方法进行灾害易发性评价是可行的。

关键词:时序InSAR;地质灾害;易发性评价;信息量模型;层次分析法

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-12-11

DOI: 10.13203/j.whugis20220192

文章编号:1671-8860(2024)08-1434-10

Evaluation of Geological Hazard Susceptibility of Baiyin City Based on Multi-temporal InSAR Deformation Measurements

GE Qiaqiao^{1,5} SUN Qian² ZHANG Ning^{3,4} HU Jun¹

1 School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2 College of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

4 China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100835, China

5 Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co. Ltd, Guangzhou 510000, China

Abstract: Objectives: Geological hazard points and hidden danger points are the data basis for geological hazard evaluation, while the existing records of geological hazard points have poor timeliness and are incomplete. To solve this problem, the deformation information obtained by multi-temporal interferometric synthetic aperture radar (InSAR) was integrated into the geological hazard evaluation model. And we explore how to make better use of the deformation information. **Methods:** The greater the deformation level, the greater the possibility of geological hazards. This paper not only takes the deformation points obtained by multi-temporal InSAR as the geological hazard points/hidden danger points, but also integrates the de-

基金项目:国家自然科学基金(42030112);湖南省自然科学基金(2020JJ2043, 2022JJ30031);湖南省重点研发项目(2023SK2012, 2022RC3042);福建省重点研发项目(2021Y3001);中国博士后科学基金(2019M650825);高分城市精细化管理遥感应用示范系统(06-Y30F04-9001-20/22)。

第一作者:盖侨侨,硕士,研究方向为InSAR地质灾害监测与评价。ge.qq@gpdiwe.com

通讯作者:孙倩,博士,副教授。sandra@hunnu.edu.cn

formation level information obtained by multi-temporal InSAR as an evaluation factor into the susceptibility evaluation model, making full use of the effective deformation information obtained by multi-temporal InSAR. And the evaluation model adopts the coupling model based on information value model and the analytic hierarchy process model to obtain the susceptibility evaluation and zoning of the geological hazards in Baiyin City, Gansu Province, China. **Results:** Through the verification of the existing geological disaster point data, it is found that the partitions in this paper are in good agreement with the existing geological hazard points distribution. In the designated extremely high-prone areas, there are nearly 8 geological disaster points within 10 km², while less than one in the extremely low-prone areas. **Conclusion:** The multi-temporal InSAR deformation information added to the geological hazard evaluation model greatly improves the timeliness and quantity of records of geological hazard points/hidden points. However, only one kind of synthetic aperture radar data cannot completely identify all geological hazard points/hidden danger points, due to the limitations of incidence angle and microwave wavelength. In the further work, we will focus on the combination of multiple deformation monitoring technologies to jointly monitor surface deformation, such as multi-sensor and multi-track InSAR technology, airborne light laser detection and ranging and high-resolution optical remote sensing.

Key words: multi-temporal InSAR; geological hazard; susceptibility evaluation; information value model; analytic hierarchy process

国土空间规划的编制和国土空间格局的优化不仅是建设美丽中国、改善环境、保护生态平衡的现实需求,也是中国建设成为现代化强国的重要前提。2019年5月,《中共中央、国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》^[1]文件中首次明确提出将资源环境承载能力和国土开发适应性评价(简称“双评价”)作为国土空间规划的依据。在“双评价”的基础上,科学划定城镇开发边界、永久基本农田和生态保护红线等管控边界。灾害评价是“双评价”中的一个重要单项评价指标,其中地质灾害评价关系着人民的生命财产安全,对国土空间规划具有重要意义。

中国国土资源广阔、地质构造复杂多样,是世界上地质灾害严重的国家之一。高效准确地获取地质灾害点信息是进行地质灾害易发性评价的首要前提,这决定了地质灾害评价的可信度。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)能全天时、全天候、大范围、高精度地监测地表长时序形变,是地质灾害识别和更新的有效手段^[2-7]。特别是时序 InSAR 技术能够有效抑制时空失相干和大气延迟的影响,已经被广泛应用于各种地质灾害监测领域。因此将 InSAR 技术应用于地质灾害评价领域,有助于降低历史灾害点记录不全面、时效性差等给评价结果带来的不利影响。国内外学者已经对基于 InSAR 技术的地质灾害评价进行了相关探索,方法主要分为两类:(1)利用 InSAR 获取的地表形变信息修正传统地质灾害易发性评

价模型的结果。该方法直接依据 InSAR 平均形变速率/累积形变的量级进行易发性分区,然后与传统的分区结果进行比对,修正传统方法分区相较于 InSAR 分区等级低的区域。如 Lu 等^[8]利用 InSAR 获取的地表形变信息更新了意大利中部阿尔诺河流域的地质灾害易发性分区图。Ciampalini 等^[9]利用永久散射体 InSAR 获取的形变数据对滑坡易发性区域进行了更新。Carla 等^[10]通过 InSAR 获取的形变分析斜坡时序形变的特征,并以此进行滑坡地质灾害易发性分析。朱玉^[11]利用时序 InSAR 技术修正了贵州省纳雍县和大方县滑坡易发性分区图。(2)将 InSAR 获取的形变信息融入到地质灾害易发性评价模型。如王京^[12]利用时序 InSAR 技术获取了滑坡隐患点,以此代替现有地质灾害点记录,对贵州、云南等地进行滑坡易发性评价研究。卢星宇^[13]利用差分 InSAR 和小基线集 InSAR 技术筛选了九寨沟的地质灾害点,以此进行地质灾害评价。张磊^[14]利用时序 InSAR 技术辅助识别地质灾害隐患点,对油气管道沿线进行地质灾害评价。陈银^[15]尝试将时序 InSAR 获取的平均形变速率量级作为一个影响因子引入滑坡易发性评价模型,发现融入形变信息的滑坡易发性评价模型更符合实际滑坡分布情况。

可以发现,将 InSAR 形变信息融入到地质灾害评价已经成为研究热点,但现有研究仍然存在以下不足:(1)只依据 InSAR 形变信息来进行地质灾害易发性分区,忽略了地质、地形、地貌等孕灾环境因子,评价依据不全面且容易受到 InSAR

形变误差的影响;(2)将InSAR形变信息融入评价模型的方法中大多忽略了形变的量级信息,而形变量级对于地质灾害的发生有显著的正相关性^[8-11]。因此,本文以地质灾害类型丰富的中国甘肃省白银市为研究区域,首先获取了覆盖白银市整个辖区的52景 Sentinel-1A 卫星合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像,利用时序 InSAR 技术获取了 2017-03—2019-07 期间的地表形变信息;然后将时序 InSAR 获取的有效形变点作为该地区的地质灾害点/隐患点,同时将获取的形变量级作为易发性评价模型的一个评价因子,对白银市进行地质灾害易发性评价及分区;最后利用已有地质灾害点数据对评价结果进行验证。

1 研究区概况

白银市位于甘肃省中北部,黄河上游中段,地理范围为 $35^{\circ}33'N\sim 37^{\circ}38'N, 103^{\circ}33'E\sim 105^{\circ}34'E$ ^[16]。该市全境呈南北长条状,东西宽 147.75 km,南北长 249.25 km,总面积 2.01 万 km^2 。白银市位于陇西黄土高原西北边缘、祁连山东延余脉向腾格里沙漠的过渡地带,地势南北高、中部低。境内绝大部分是山区,山地与宽谷平原并存。境内的地貌特征以基岩山地和山间盆地为主,祁连山脉和秦岭余脉横穿白银市西北部,地面基岩裸露,阴坡面有植被覆盖;东南部属于陇中盆地部分,主要以黄土塬、梁和峁相间的黄土高原沟壑区,除个别基岩山地以外,地面被黄土覆盖。总体来说,白银市辖区山高坡陡,沟谷纵横,且黄土地貌土质松软,给地质灾害的发育提供了有利条件。同时白银市境内富含有色重金属、煤炭等矿产资源,矿产资源的开发也会造成地质灾害隐患。

白银市的主要地质灾害类型包括滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝以及不稳定斜坡。据白银市人民政府办公室印发的《白银市 2020 年地质灾害防治工作方案》^[17],截至 2019 年底,白银市地质灾害威胁人口达 6.3 万人,威胁财产 23.99 亿元。

2 时序 InSAR 数据处理

本实验中 SAR 影像数据采用 2014 年欧空局发射的新一代中分辨率卫星哨兵 1 号 A 星(Sentinel-1A)数据。Sentinel-1A 卫星为 C 波段 SAR 卫星,采用全新的 TOPSAR 成像模式,距离向分辨率为 3.7 m,

方位向分辨率为 14 m,具备 12 d 的重返周期和 $250\text{ km}\times 250\text{ km}$ 的大范围成像能力。2016 年, Sentinel-1B 卫星的发射进一步提高了该数据的时间分辨率,在 Sentinel-1A 星和 Sentinel-1B 星串联模式下,可达到 6 天一次重返观测。在欧洲空间局官网可免费获取 Sentinel-1 卫星数据的全球存档、实时观测数据,这为地质灾害形变监测提供了丰富的数据来源。本研究获取了覆盖白银市整个辖区的 Sentinel-1A SAR 影像,该区域由轨道 55 的上下两景影像可完全覆盖(如图 1 所示),重返周期为 12 d,在时间上选择了 2017-03—2019-07 共 52 个时刻 SAR 影像数据。

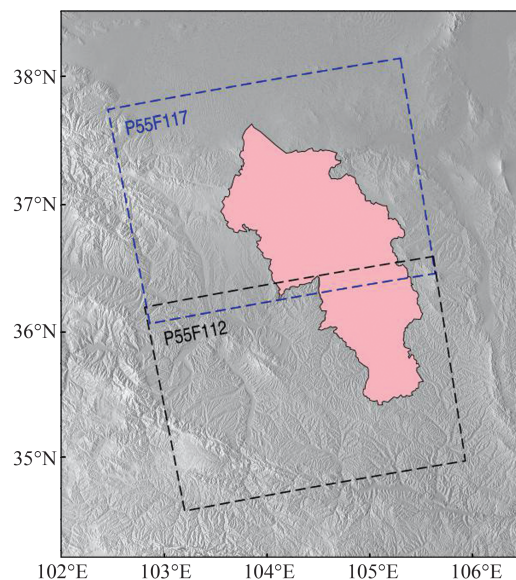


图1 研究区域数据覆盖情况

Fig. 1 Shaded Relief Map of the Study Area

在 SAR 数据处理中,首先使用 GAMMA 软件进行数据预处理,生成一个短基线集的差分干涉对。本文采用美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)提供的 1-arc 航天飞机雷达地形任务(shuttle radar topography mission, SRTM)作为外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据去除地形相位,时间基线阈值为 36 d,空间基线阈值为 200 m,最终生成 159 对差分干涉对。同时,轨道误差和与地形相关的大气相位分别用多项式拟合和构建地形相关的模型去除^[18-20]。大范围监测往往包含多种形变类型,因此为避免 InSAR 形变解算中形变模型带来的解算误差,本文采用基于假设检验和自适应形变模型^[21]的解算方法进行时序 InSAR 后处理,得到白银市形变结果。

白银市的年平均形变速率如图 2 所示,研究区域内形变速率范围为 $-56.7\sim 9.3\text{ cm/a}$,其中正

号表示沿雷达视线向靠近卫星方向移动,负号表示沿雷达视线向远离卫星方向移动。形变聚集最为显著的是矿产开采区,如白银区的小铁山矿、平川区的宝积山矿、红会煤矿以及靖远县的王家山矿等;此外,沿黄河干流沿岸形变也较为明显。为了能更清楚地看出主要形变区的形变情况,分别将矿产开采区和黄河干流部分区域在图 2(a)、图 2(b)中进行了显示。

在数据处理过程中,受限于数据质量和技术人员经验,时序 InSAR 的形变结果会存在一些误

差。为避免这些误差给后续评价模型带来影响,首先需要根据时序 InSAR 获取的平均形变速率图筛选形变点:一是去除明显的形变噪点;二是形变区域通常在空间上呈现聚集状态,分布较为离散的形变点极有可能是数据处理过程中产生的误差点,此类点位同样被剔除。通过筛选,一共得到 32 213 914 个形变点。这些筛选得到的形变点将作为评价模型中的地质灾害点/隐患点,同时将形变点的平均形变速率量级作为一个评价因子融入评价模型中。

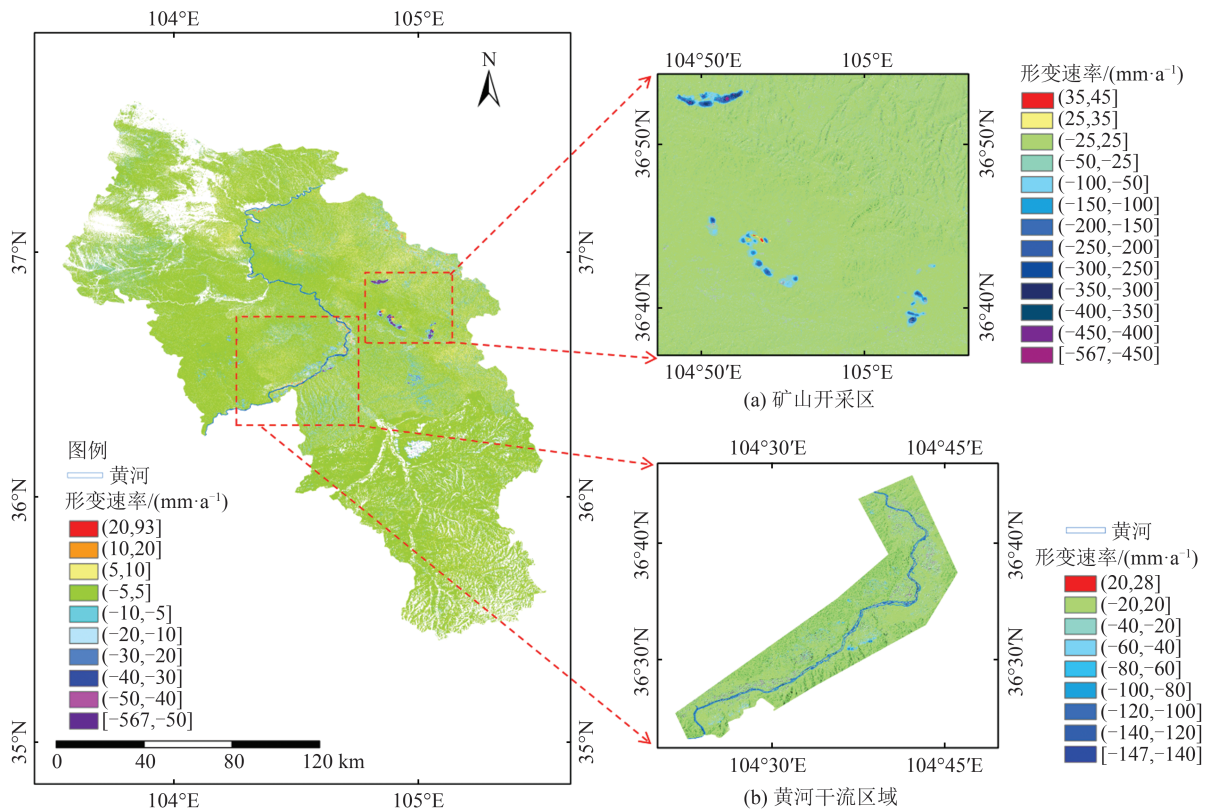


图 2 白银市平均形变速率

Fig. 2 Average Deformation Velocity Rate of Baiyin City

3 地质灾害易发性评价模型建立

3.1 评价因子

地质灾害易发性评价是指一定范围内由孕灾地质条件决定地质灾害发生的可能性^[22]。评价因子选择的合适与否决定着易发性评价结果的好坏,但是由于地域之间的差异性,地质灾害的影响因素至今为止并没有统一标准。因此,在对白银市已有地质灾害资料的详细调查和参考国内外学者进行地质灾害易发性评价常用评价因素的基础上^[22-25],本次研究选择高程、坡度、坡向、地形起伏、距水系距离、地层岩性、土地利用以及 InSAR 形变量级等(易发性评价通

常不考虑降雨、地震等诱发因子,其属于地质灾害危险性评价范畴)作为白银市地质灾害的影响因子,并将各评价影响因子进行分级(如图 3 所示)。

为深入研究各个影响因子对灾害发生的贡献,采用形变点相对点数或相对面积密度公式来表征各影响因子的分级在地质灾害中的影响程度,其表达式为:

$$D = \frac{N_i/S_i}{N/S} = \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中, N 为形变点总数; N_i 为影响因子的第 i 个分级中分布的形变点个数; S 为研究区总面积; S_i 为影响因子的第 i 个分级包含的面积。

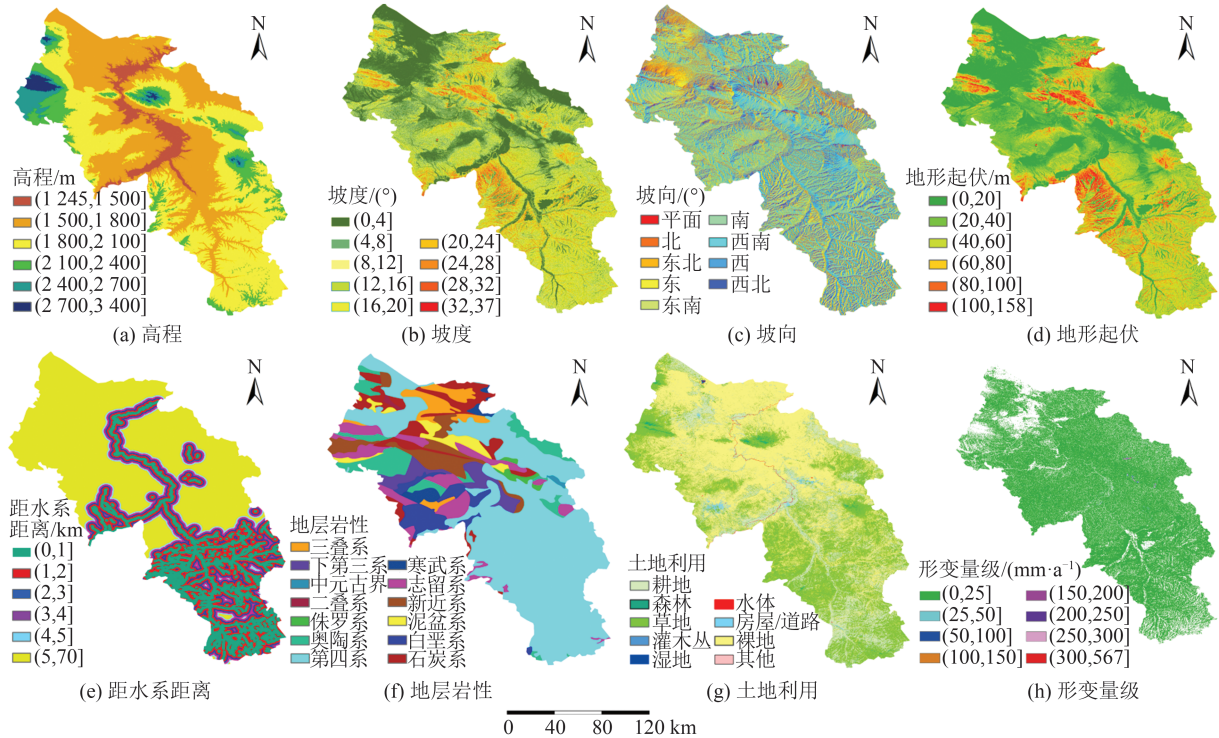


图3 地质灾害评价因子

Fig. 3 Geological Hazard Evaluation Factors

1) 高程

高程是地质灾害发育的主要影响因素之一,斜坡的状态与高程紧密相关。本文使用USGS网站获取的SRTM DEM 30 m数据提取高程值,研究区海拔高度介于1 245~3 313 m之间,将其分为6个等级(图3(a))。由图4(a)可以看出,白银市形变点主要分布在1 500~2 100 m海拔区间。

2) 坡度

坡度是另一类重要的地质灾害发育影响因子,它对斜坡的稳定性有直接影响。本文从SRTM DEM 30 m数据中计算坡度因子,白银市境内坡度范围为 0° ~ 37° ,将其分为9个等级(图3(b))。由图4(b)可以看出,研究区域内地质灾害主要集中在坡度小于 20° 的区域,推测主要是因为坡度较低的区域受人类活动以及修建造建筑物的影响。

3) 坡向

坡向是指山体斜坡面的倾向,其对地质灾害的影响主要是不同坡向受到太阳光照射的程度不同,导致植被生长状况、水分蒸发、岩石风化等在空间上产生差异,间接影响坡体的稳定性。坡向因子同样通过SRTM DEM 30 m数据提取,将其分为平面、北、东北、东、东南、南、西南、西、西北共9个方向(图3(c))。由图4(c)可以看出,研究区内地质灾害形变点的相对密度表现为南面坡多、北面坡少的特征,主要分布在东南、正南和

西南方向。这是因为阳坡的光照条件良好、水分蒸发快、植被覆盖度低且土壤和植被的生物化学作用强,为地质灾害的发育提供了条件。

4) 地形起伏

地形起伏可以很好地描述微地貌特征,反映小区域的地势变化,是地质灾害评价的重要影响因子。地形起伏度能够影响岩土体和斜坡的抗侵蚀、抗风化能力,有一定起伏度是滑坡、崩塌等地质灾害发育的必要条件。以高程为基本数据,计算研究区地形起伏度,介于0~158 m之间,将其分为6个等级(图3(d))。由图4(d)可以看出,当地表起伏介于20~100 m之间时,地质灾害点的密度呈下降趋势,具有明显的规律性。

5) 距水系距离

河流水系反映了一个地区地表径流的大小,同时体现了该地区的沟谷密度。水系对地质灾害的发育具有极大作用,特别是滑坡灾害。白银市境内水系分布密集,除黄河干流外还有祖厉河、渭河、清水河三大支流及其他小河流。据已获取的地质灾害数据,白银市地质灾害发育具有沿河谷两岸分布的特征。由距河流的远近关系,对研究区域的水系分区,分别为(0, 1]、(1, 2]、(2, 3]、(3, 4]、(4, 5]、(5, 70] km共6个等级(图3(e))。由图4(e)可以看出,在5 km范围内地质灾害点的个数随着距河流距离变远而呈减少趋势,在1 km以内灾害点个数最多,

规律性较为明显;在 5 km 的距离外的形变点的主要影响因子为其他因素,而非水系影响。

6) 地层岩性

地层岩性是地质灾害发育的物质基础,岩土软硬程度、类型以及结构决定了其应力分布、抗风化能力、抗破碎能力以及抗侵蚀的能力。根据研究区内的地层类型,分为 13 个类型(图 3(f)),分别为三叠系、奥陶系、新近系、石炭系、泥盆系、第四系、寒武系、白垩系、下第三系、侏罗系、志留系、二叠系和中元古界。由图 4(f)可以看出,白银市地质灾害主要发生在第四系和新近系地层中。

7) 土地利用

土地利用情况是地质灾害孕育的重要影响因素,植被覆盖能提高土体的抗剪能力,不同植被覆盖的固土能力不同,地质灾害多发生在无植

被或低植被覆盖的区域。此外,人类因生产生活建造的房屋、道路等对土地不合理的利用,也会成为地质灾害发生的诱因。根据研究区的土地利用情况,将其分为 9 种类型(图 3(g)),分别为耕地、森林、草地、灌木丛、湿地、水体、房屋/道路、裸地及其他。由图 4(g)可以看出,裸地区域发生的地质灾害最多。

8) 形变量级

一般来说,形变量级大的区域发生地质灾害的可能性越大。将时序 InSAR 监测的平均形变速率融入地质灾害易发性评价模型,将其作为一个影响因素。基于自然断点法^[26],将时序 InSAR 获取的平均形变速率按量级分为 8 个等级(图 3(h)),分别为 (0,25]、(25,50]、(50,100]、(100,150]、(150,200]、(200,250]、(250,300]、(300,567]mm/a。

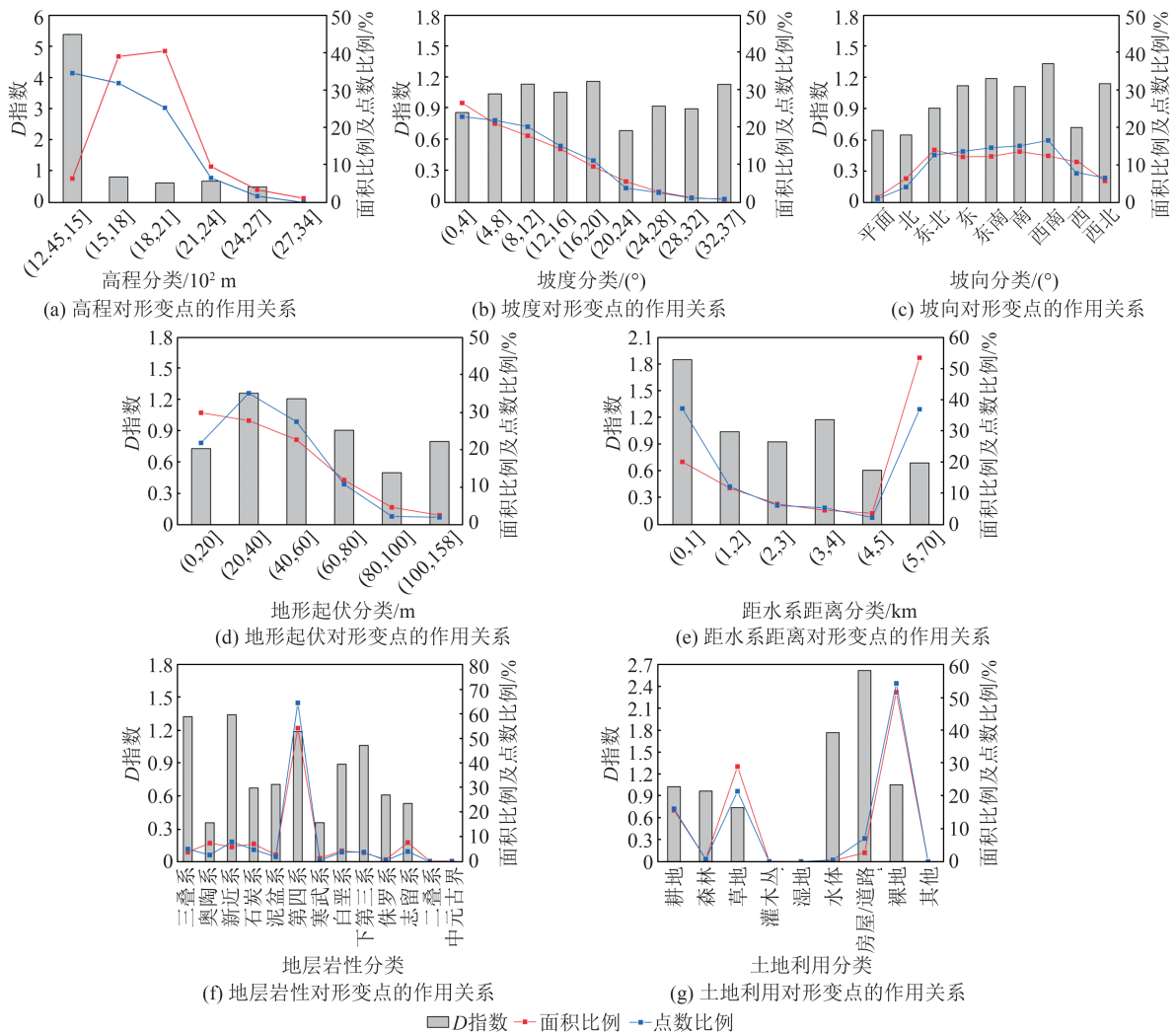


图 4 评价因子对形变点的作用关系

Fig. 4 Relationship Between the Evaluation Factors and the Deformation Points

3.2 评价模型

1) 信息量模型

信息量模型最早是由 van Westen 从信息论

理论引用到地质灾害评价领域中的^[27],其原理是利用信息熵分析各个影响因素共同作用下的地质灾害的易发性程度。具体来说是通过求解影

响因子与地质灾害形变点之间的信息量值来确定它们之间的相关程度。各评价因子等级的信息量 I_n 为:

$$I_n = I(x_i, H) = \ln \frac{N_i/S_i}{N/S} \quad (2)$$

式中, $I(x_i, H)$ 为单个影响因素 x_i 对地质灾害 H 的信息量; S_i 为研究区内影响因素 x_i 所占单元数; S 为研究区内的评价单元总数; N_i 为研究区内影响因素 x_i 中包含地质灾害的单元数; N 为研究区有地质灾害形变点分布的所有单元总数。

本文中高程、坡度、坡向、地形起伏、距水系距离、地层岩性、土地利用等评价因子等级的信息量均由式(2)计算,而加入的 InSAR 形变量级评价因子在基于形变量级越大、发生地质灾害可能性越大的假设下,进行线性定权,令时序 In-

SAR 的 8 个等级权重分别为 0.125、0.25、0.375、0.5、0.625、0.75、0.875、1。

2) 层次分析法

层次分析法在运筹统计学中有着极其重要的地位,是一种将定性和定量分析相结合的多目标评价方法。考虑到信息量评价模型忽略了不同类型评价因子对地质灾害发生贡献的差异,本文利用层次分析法为各评价因子定权,以此来改进信息量评价模型。具体实施步骤如下:

(1) 建立层次模型。根据地质灾害评价的总体目标对因素分层,形成层次结构。

(2) 建立判断矩阵。层次分析法的关键是构建判断矩阵,通常是采用 Saaty 给出的 1~9 标度法^[28],将各影响因子两两对比后根据重要性给各因子赋值。判断矩阵如表 1 所示。

表 1 影响因子判断矩阵

Tab. 1 Judgment Matrix of Impact Factors

影响因子	高程	坡度	坡向	地形起伏	距水系距离	地层岩性	土地利用	形变量级
高程	1	1/3	1/3	1/5	1/6	1/4	1/5	1/7
坡度	3	1	2	1/2	1/4	1/3	1/3	1/5
坡向	3	1/2	1	1/2	1/4	1/2	1/3	1/5
地形起伏	5	2	2	1	1/2	2	1	1/3
距水系距离	6	4	4	2	1	2	2	1/2
地层岩性	4	3	2	1/2	1/2	1	1/2	1/2
土地利用	5	3	3	1	1/2	2	1	1/3
形变量级	7	5	5	3	2	2	3	1

(3) 确定各评价因子权重。计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,确定各评价因子的相对权重值。本文根据判断矩阵获得的各影响因子权重为 $p^T = [0.03 \ 0.06 \ 0.05 \ 0.13 \ 0.20 \ 0.10 \ 0.14 \ 0.29]$ 。

(4) 利用一致性比率检验 (consistency ratio, CR) 权值分配的合理性。判断矩阵不一定满足完全一致性,因此还需对判断矩阵进行随机一致性比率检验。当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵合理,评价因子权重值具有统计意义。计算公式如下:

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - N)/(N - 1) \quad (4)$$

其中, λ_{\max} 为矩阵的最大特征值; N 为判断矩阵的阶数; CR 为判断矩阵的随机一致性比率; CI (consistency index) 为判断矩阵一致性指标; RI (random index) 为判断矩阵的平均随机一致性指标^[29]。本文中 CR 的值为 0.03, 小于阈值 0.1, 因此可以认为所构建的矩阵符合完全一致性,其权重分布是合理的。

3) 耦合信息量和层次分析法的评价模型

根据层次分析法计算的各评价因子权重,重新计算各评价因子等级的信息量:

$$I_n = p_i \cdot I(x_i, H) = p_i \cdot \ln \frac{N_i/S_i}{N/S} \quad (5)$$

式中, p_i 为各评价因子的权重; 其他符号含义同式(2)。

4 地质灾害易发性评价结果及精度检验

本文根据耦合信息量和层次分析法的评价模型,采用栅格单元作为评价单元,使用 ArcGIS 软件进行栅格计算和叠加分析,计算出每个评价单元在各评价因子共同作用下的总信息量。

对总信息量进行归一化处理,进行地质灾害易发性分区图的划分,信息量值越大,地质灾害越容易发生。利用 ArcGIS 中的自然间断点分级法将最终结果分为:极低易发区 $[0, 0.242)$ 、低易发区 $[0.242,$

0.370)、中易发区[0.370,0.478)、高易发区[0.478,0.661)和极高易发区[0.661,1),最终得到白银市 5 个县区的地质灾害易发性分区图(如图 5 所示)。

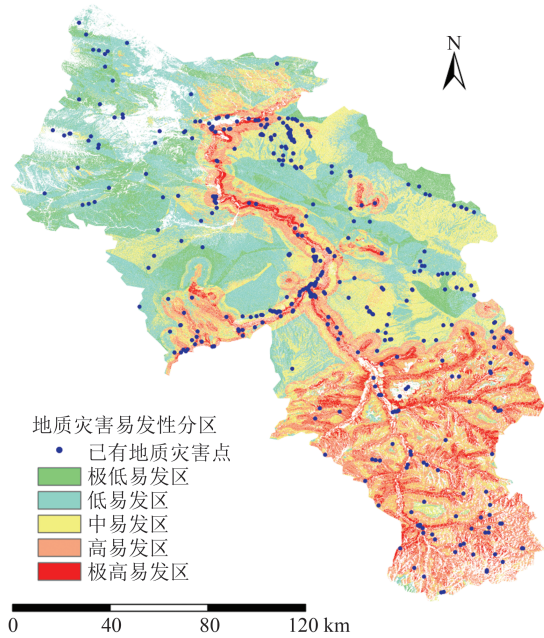


图 5 白银市地质灾害易发性分区图

Fig. 5 Geological Hazard Susceptibility Zoning Map of Baiyin City

由灾害易发性分区图可以看出,白银市的地质灾害高风险区主要沿河流和矿区分布。易发性评价结果与已有地质灾害点分布对比表如表 2 所示,从分布面积上看,低易发区及其以下区域占 39.99%,中易发区占 24.92%,高易发区占 29.10%,极高易发区占 5.99%。研究区内地质灾害高易发区以上面积约为 6 285.98 km²,占总面积的 35.09%;低易发区是分布面积最广的风险区,占总面积的 29.30%。同时通过已有记录的地质灾害点验证本研究所做易发性分区图的效果,发现已有记录的地质灾害点聚集的区域绝大多数位于本文所划分的中易发区及其以上区域;低风险区平均每 10 km²面积内地质灾害点个数小于 1 个,而极高风险区可达近 8 个。由此可见,本文所得的地质灾害易发性评价结果与已有地质灾害的分布较为吻合,评价结果较好。

5 结 语

本文探究了如何将时序 InSAR 获取的地表形变应用于地质灾害评价中的问题,创新性地提出同时将 InSAR 获取的形变点作为地质灾害点/隐患点以及将 InSAR 形变量级作为一个评价因子融入地质灾害易发性评价模型。通过分区图

表 2 易发性评价结果与已有地质灾害点分布对比
Tab. 2 Comparison of Susceptibility Evaluation Results and Distribution of Existing Geological Disaster Points

易发性等级	面积比 例/%	已有地 质灾害 点个数	已有地质 灾害点比 例/%	单位面积内已有地 质灾害点个数/ (个·10 km ⁻²)
极低 易发区	10.69	15	4.75	0.8
低易 发区	29.30	41	12.97	0.8
中易 发区	24.92	71	22.47	1.6
高易 发区	29.10	106	33.54	2.0
极高 易发区	5.99	83	26.27	7.7

可以得出,白银市地质灾害高易发区主要沿河流分布,同时矿区开采也带来了较大的地质灾害隐患。对比已有地质灾害点位,发现地质灾害点位的分布与所划分区有很好的吻合性,证明了基于时序 InSAR 提取的形变信息用于地质灾害易发性评价是可行的,且效果较好。因此,本研究为白银市的地质灾害管理和防治提供了依据,同时也为中国目前正在落实的“双评价”工作提供一定参考。

此外,本研究中地质灾害评价模型加入的时序 InSAR 形变大大提升了地质灾害点/隐患点记录的时效性和数量,但由于 SAR 卫星本身的限制(入射角和微波波长等),仅凭一种 SAR 卫星数据不可能完全识别所有地质灾害点/隐患点。后续研究会考虑综合多种形变监测技术(如多平台多轨道 InSAR 监测、机载激光雷达和高分辨率光学遥感等)共同反演地表形变,进一步提高地质灾害点/隐患点的普查能力。

参 考 文 献

- [1] Several Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on Establishing a Land and Space Planning System and Supervising the Implementation[Z]. 2019 (中共中央,国务院. 中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见[Z]. 2019)
- [2] Liu Bin, Ge Daqing, Wang Shanshan, et al. Combining Application of TOPS and ScanSAR InSAR in Large-Scale Geohazards Identification[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1756-1762. (刘斌,葛大庆,王珊珊,等. TOPS 和 ScanSAR 模式 InSAR 在广域地灾隐患识别

- 中的联合应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1756-1762.)
- [3] Hu J, Wang Q J, Li Z W, et al. Retrieving Three-Dimensional Coseismic Displacements of the 2008 Gaize, Tibet Earthquake from Multi-path Interferometric Phase Analysis[J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(3): 1311-1322.
- [4] Li Zhenhong, Han Bingquan, Liu Zhenjiang, et al. Source Parameters and Slip Distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai Earthquakes Constrained by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 887-897. (李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等. InSAR数据约束下2016年和2022年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 887-897.)
- [5] Lu Chaoran, Cai Jiehua, Liu Donglie, et al. Detection of Geological Hazards Danger Points and Deformation Time Series Analysis Based on Satellite InSAR Technique[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 12(2): 216-222. (陆超然, 蔡杰华, 刘东烈, 等. 基于卫星InSAR技术的地质灾害隐患点探测与形变分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(2): 216-222.)
- [6] Xu Qiang, Pu Chuanhao, Zhao Kuanyao, et al. Time Series InSAR Monitoring and Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Land Subsidence in Yan'an New District[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 957-969. (许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序InSAR监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 957-969.)
- [7] Zhu Jianjun, Yang Zefa, Li Zhiwei. Recent Progress in Retrieving and Predicting Mining-Induced 3D Displacements Using InSAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(2): 135-144. (朱建军, 杨泽发, 李志伟. InSAR矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 135-144.)
- [8] Lu P, Catani F, Tofani V, et al. Quantitative Hazard and Risk Assessment for Slow-Moving Landslides from Persistent Scatterer Interferometry [J]. *Landslides*, 2014, 11(4): 685-696.
- [9] Ciampalini A, Raspini F, Lagomarsino D, et al. Landslide Susceptibility Map Refinement Using PSInSAR Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184: 302-315.
- [10] Carlà T, Intrieri E, Raspini F, et al. Perspectives on the Prediction of Catastrophic Slope Failures from Satellite InSAR[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 14137.
- [11] Zhu Yu. Landslide Susceptibility Assessment of Dafang and Nayong County of Guizhou Province Combining with PS-InSAR[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020. (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.)
- [12] Wang Jing. Research on Monitoring of Landslide Geological Distors Using Time Series Spaceborne InSAR Technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (王京. 长时序星载InSAR技术滑坡地质灾害监测研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.)
- [13] Lu Xingyu. Risk Assessment of Geological Hazards in Jiuzhaigou, China Based on InSAR Technique [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (卢星宇. 基于InSAR技术的九寨沟地质灾害危险性评价研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021.)
- [14] Zhang Lei. Research on Identification and Evaluation Methods of Geological Disasters Along Oil and Gas Pipelines [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2020. (张磊. 油气管道沿线地质灾害识别与评价方法研究[D]. 成都:四川师范大学, 2020.)
- [15] Chen Yin. Landslide Susceptibility Assessment of G318 Lasa Section Combining with PSInSAR [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (陈银. 融入PSInSAR的318国道拉萨段滑坡敏感性评价[D]. 成都:西南交通大学, 2018.)
- [16] The People's Government of Baiyin Municipality. Overview of Baiyin City [Z]. <http://www.baiyin.gov.cn/zjby.html>. (白银市人民政府. 白银概况 [Z]. <http://www.baiyin.gov.cn/zjby.html>.)
- [17] The People's Government of Baiyin Municipality. Work Plan for Geological Disaster Prevention and Control in Baiyin City in 2020 [Z]. http://www.baiyin.gov.cn/xxgk/zfwjn/202006/t20200623_168328.html, 2020. (白银市人民政府办公室. 白银市2020年地质灾害防治工作方案 [Z]. http://www.baiyin.gov.cn/xxgk/zfwjn/202006/t20200623_168328.html, 2020.)
- [18] Liu Guoxiang. Principle and Application of InSAR [M]. Beijing: Science Press, 2019. (刘国祥. InSAR原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.)
- [19] Xu B, Li Z W, Wang Q J, et al. A Refined Strategy for Removing Composite Errors of SAR Interferogram [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 143-147.
- [20] Xu W B, Li Z W, Ding X L, et al. Interpolating Atmospheric Water Vapor Delay by Incorporating Terrain Elevation Information [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(9): 555-564.

- [21] Hu J, Ge Q Q, Liu J H, et al. Constructing Adaptive Deformation Models for Estimating DEM Error in SBAS-InSAR Based on Hypothesis Testing[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 2006.
- [22] Zhang Xiaodong. Study on Geological Disaster Risk Assessment Based on RS and GIS in Yanchi County, Ningxia[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018. (张晓东. 基于遥感和 GIS 的宁夏盐池县地质灾害风险评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.)
- [23] Kumar R, Anbalagan R. Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process (AHP) in Tehri Reservoir Rim Region, Uttarakhand [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2016, 87(3): 271-286.
- [24] Du Qian, Fan Wen, Li Kai, et al. Geohazard Susceptibility Assessment by Using Binary Logical Regression and Information Value Model[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2): 220-226. (杜谦, 范文, 李凯, 等. 二元 Logistic 回归和信息量模型在地质灾害分区中的应用[J]. *灾害学*, 2017, 32(2): 220-226.)
- [25] Wang Binghu, Ma Xuejun, Shao Changqing, et al. Risk Assessment of Ground Fissures Based on AHP and Information Method[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(10): 91-96. (王兵虎, 马学军, 邵长庆, 等. 基于层次分析和信息量法的地裂缝危险性评价[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(10): 91-96.)
- [26] He Enye, Ji Xuanliang, Li Xiao, et al. The Spatiotemporal Distribution and Hazard Grading of Red Tides in Fujian Coast Waters During 2001—2020 [J]. *Marine Science Bulletin*, 2021, 40(5): 578-590. (何恩业, 季轩梁, 李晓, 等. 2001—2020 年福建沿海赤潮灾害分级和时空分布特征研究[J]. *海洋通报*, 2021, 40(5): 578-590.)
- [27] van Leijen F J, Hanssen R F. Persistent Scatterer Density Improvement Using Adaptive Deformation Models [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona, Spain, 2007.
- [28] Saaty T L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, 15(3): 234-281.
- [29] Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation* [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

(上接第 1433 页)

- [36] Yu C, Li Z H, Penna N T. Triggered Afterslip on the Southern Hikurangi Subduction Interface Following the 2016 Kaikōura Earthquake from InSAR Time Series with Atmospheric Corrections[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 251: 112097.
- [37] Tong X P, Schmidt D. Active Movement of the Cascade Landslide Complex in Washington from a Coherence-Based InSAR Time Series Method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 405-415.
- [38] Tymofeyeva E, Fialko Y. Mitigation of Atmospheric Phase Delays in InSAR Data, with Application to the Eastern California Shear Zone [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2015, 120(8): 5952-5963.
- [39] Xiao R Y, Yu C, Li Z H, et al. Statistical Assessment Metrics for InSAR Atmospheric Correction: Applications to Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) in Eastern China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 96: 102289.
- [40] Gambolati G, Teatini P. Land Subsidence and Its Mitigation[M]. Canada: The Groundwater Project, 2021.
- [41] Fuhrmann T, Garthwaite M C. Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-geometry Data Fusion [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 241.
- [42] Geertsma J. Land Subsidence Above Compacting Oil and Gas Reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1973, 25(6): 734-744.
- [43] Zhi Liehui, Li Xin, Ma Tiantian, et al. The Spatiotemporal Evolution of Land Use Trajectories, Drivers and the Ecosystem Services in Liao River Delta in the Past Four Decades [J]. *Acta Scientiarum Circumstantiae*, 2022, 42(1): 141-150. (智烈慧, 李心, 马田田, 等. 辽河三角洲土地利用变化轨迹、驱动过程及生态系统服务时空演变[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 141-150.)
- [44] Wu Ting, Hou Xiyong. Tendency of Coastline Variations on China's Mainland Since 1940s[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(1): 80-88. (毋亭, 侯西勇. 1940s 以来中国大陆岸线变化的趋势分析[J]. *生态科学*, 2017, 36(1): 80-88.)
- [45] Wang Y, Feng G, Li Z, et al. Retrieving the Displacements of the Hutubi (China) Underground Gas Storage During 2003—2020 from Multi-track InSAR [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 268: 112768.