引文格式:王倩雯,宋闯,陈博,等.黄土高原白草塬引洮工程前后17年InSAR时序形变监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2213-2225.DOI:10.13203/j.whugis20240443

Citation: WANG Qianwen, SONG Chuang, CHEN Bo, et al. InSAR Time-Series Deformation Monitoring and Analysis for 17 Years Before and After the Yintao Project in Baicaoyuan, Loess Plateau[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(11):2213-2225.DOI:10.13203/j.whugis20240443

黄土高原白草塬引洮工程前后17年InSAR时序形变监测与分析

王倩雯[1,2,3] 宋 闯[1,2,4] 陈 博[1,2,3] 余 琛[1,2,4] 申传庆[5] 李振洪[1,2,4]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 黄土科学全国重点实验室,陕西 西安,710054
3 长安大学地学与卫星大数据研究中心,陕西 西安,710054
4 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054
5 自然资源部陕西基础地理信息中心,陕西 西安,710054

摘 要:黄土高原是中国重要的农业区和生态屏障区,但农业活动长期以来受到水资源短缺等问题的困扰。开展大型水利工程有助于解决灌溉水资源短缺问题,然而同时可能会引发次生灾害(如地面沉降等),这些灾害极大地威胁农业生产活动,却较少有研究定量评估大型水利工程对黄土高原农业区地面沉降的影响。选取甘肃省会宁县白草塬这一典型的黄土高原灌溉塬区作为研究对象,采用小基线集合成孔径雷达干涉测量技术,结合7景先进陆地观测卫星PALSAR和472景Sentinel-1A影像,对白草塬地区进行了为期17年的地表形变时序监测与分析,并通过K-means聚类分析和小波变换对地面沉降的时间序列进行深入探讨,识别出白草塬不同区域的沉降模式,分析其与土地利用、降雨间的关系。结果表明,2007—2010年期间,白草塬地区在卫星视线向的地表年平均形变速率为-17~0 mm/a,在2015—2023年期间,年平均形变速率显著增加,达到-110~30 mm/a。这一变化说明,自2014年引洮工程开通后,白草塬地区的地面沉降在时空分布上呈现出显著增强的趋势。此外,白草塬地区的地面沉降主要集中在耕地和草地,引洮工程通水灌溉是该地区地面沉降的首要因素,降雨因素影响较小。研究结果为理解黄土高原地区受农业活动影响的地表运动过程、评估地质灾害风险以及优化水资源管理和土地利用规划提供了重要的依据。

关键词:白草塬;SBAS-InSAR;地面沉降;K-means聚类;小波变换

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-11-26

DOI:10.13203/j.whugis20240443 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2213-13

InSAR Time-Series Deformation Monitoring and Analysis for 17 Years Before and After the Yintao Project in Baicaoyuan, Loess Plateau

WANG Qianwen[1,2,3] *SONG Chuang*[1,2,4] *CHEN Bo*[1,2,3] *YU Chen*[1,2,4]
SHEN Chuanqing[5] *LI Zhenhong*[1,2,4]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 State Key Laboratory of Loess Science, Xi'an 710054, China
3 Big Data Center for Geosciences and Satellites (BDCGS), Chang'an University, Xi'an 710054, China
4 Key Laboratory of Western China's Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China
5 Shaanxi Basic Geographic Information Center, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives:** The loess plateau is an important agricultural and ecological barrier region in China, but agricultural activities in this area have long been plagued by problems such as water scarcity. The implementation of large-scale water conservancy projects can help address the shortage of irrigation water.

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3008402);中国博士后科学基金特别资助(2024T170759);陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队(2022)。

第一作者:王倩雯,硕士生,研究方向为InSAR地表形变监测应用。wqw0707@chd.edu.cn

通信作者:宋闯,博士,副教授。chuang.song@chd.edu.cn

However, such projects may also trigger secondary disasters, such as land subsidence. These disasters pose a significant threat to agricultural production activities. Nevertheless, few studies have quantitatively assessed the impact of large-scale water conservancy projects on land subsidence in the agricultural areas of the Loess Plateau. **Methods**: The research focused on Baicaoyuan in Huining County, Gansu Province, China, applying small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar technology. It involved the analysis of seven scenes of advanced land observation satellite PALSAR and 472 Sentinel-1A images to monitor and analyze surface deformation over a period of 17 years. Through *K*-means clustering analysis and wavelet transformation, an in-depth exploration of the time series of land subsidence was conducted to identify the subsidence patterns in different areas of Baicaoyuan, and to analyze their relationship with land use and rainfall. **Results**: The research found that the annual surface deformation rate in Baicaoyuan fluctuated from −17 to 0 mm/a between 2007 and 2010. This rate increased significantly between −110 and 30 mm/a from 2015 to 2023. This change suggests a substantial trend of enhanced ground subsidence following the commencement of the 2014 Yintao Project. **Conclusions**: Land subsidence in the Baicaoyuan area is primarily concentrated in cultivated and grassland areas. The irrigation from the Yintao Project is the leading factor contributing to the land subsidence in the region, and there is a certain correlation with rainfall factors during the period from 2018 to 2020.

Key words: Baicaoyuan; SBAS-InSAR; land subsidence; *K*-means clustering; wavelet transformation

地面沉降是一种区域性地面高程下降的现象,通常由自然因素和人类活动共同引发,常伴随着难以逆转的环境和资源损失[1-5]。这一问题在全球众多城市普遍存在,并对社会经济发展、城市规划以及居民生活带来了显著影响[6-9]。黄土高原作为中国重要的农业区和生态屏障,尽管在保障国家粮食安全和区域生态平衡中发挥着关键作用,却长期面临水资源短缺和地面沉降的双重挑战,严重制约了其可持续发展。白草塬地处黄土高原丘陵沟壑区,水资源匮乏严重阻碍当地发展[10],2006年11月建设引洮供水工程旨在解决此问题。然而,在黄土塬地区湿陷性黄土与沟壑地貌复杂多变这一地质和地貌背景下开展如此大规模的水利工程[11],导致白草塬在引洮工程启用后出现了不同程度的地面沉降现象[12]。因此,对该地区地面沉降的时空演化规律进行深入探究,不仅能够为白草塬地区的可持续发展策略提供有力支撑,同时也能够为干旱或半干旱黄土塬区域的水资源管理及地面沉降的科学防控工作奠定坚实的理论基础。

传统的地面沉降监测手段,如水准测量和全球导航卫星系统测量,在大范围监测时,所需的设备和人力资源投入都非常庞大。此外,传统方法的点状测量特性使得监测结果往往不够全面,无法有效反映大范围区域内的沉降变化。这种局限性限制了其在城市建设、基础设施维护和自然灾害监测等领域的广泛应用。利用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术能够实现全天候、全天时、大范围的监测[13-15]。其中,小基线集InSAR(small baseline subsets InSAR, SBAS-InSAR)技术极大提升了监测的精度和可靠性[16-20]。SBAS-InSAR通过处理小基线集的SAR影像,能够有效减少因时空基线过长导致的失相干问题,同时减轻了大气效应和地形因素对结果的影响。大量研究已证明,SBAS-InSAR技术在植被覆盖区域和城市地表形变监测中具有极高的适用性和可靠性[18],使其成为地面沉降监测的核心技术手段之一。在利用SBAS-InSAR获取研究区域形变数据后,如何进一步挖掘其时空分布信息,从空间和时间两个维度量化地面沉降的影响因素,对于地面沉降的防治管理十分重要。为此,基于InSAR监测数据,需要结合聚类分析、时间序列相关性分析等技术,分析地面沉降的驱动机制。

本文选取先进陆地观测卫星(advanced land observation satellite, ALOS) PALSAR和Sentinel-1A影像,利用SBAS-InSAR技术获取了2007—2023年期间白草塬地区的地表形变信息。之后利用*K*-means聚类方法,基于形变时间序列沉降样本数据自动分类,有效揭示地面沉降的空间演化特征[21],挖掘不同类别形变信息的潜在模式,例如形变的周期性、突发性或趋势性变化。并利用小波变化和空间相关性初步讨论了不同沉降类型的影响因素。研究结果将为白草塬地区的规划建设和沉降防控措施提供科学依据。

1　研究区域

白草塬(36.13°N～36.24°N,104.91°E～105.11°E)位于中国甘肃省会宁县的东北部,如图1所示。该地区处于黄土高原和青藏高原的交汇地带,地质构造复杂,主要由变质岩和花岗岩构成,上层广泛分布着第三系红层和第四系黄土,黄土厚度约为500～600 m[10, 22]。白草塬地势相对平坦,海拔在1 600～1 900 m之间,整体呈东南向西北倾斜,坡度在5°～10°。境内沟壑纵横,遍布V型深谷,地貌特征包括黄土堆积的侵蚀塬地、梁峁顶面残塬,以及河流切割形成的沟谷地阶地貌[23]。该区域年降水量极少且分布不均,加之地表水资源匮乏,地下水资源开采难度大,导致当地水资源供应严重不足。这一状况直接威胁该地区的农业灌溉、工业用水及居民的日常生活。为缓解这一问题,当地政府启动了引洮工程。该工程一期于2014-12-28正式通水,二期于2021-09-28顺利通水,进一步提升了该区域的供水能力[24]。

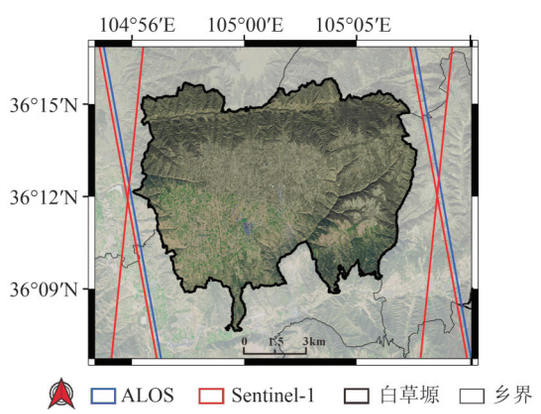


图1　研究区域

Fig. 1　The Study Area

2　研究数据与方法

2.1　研究数据

本文旨在探讨白草塬地区在引洮工程启动前后地面沉降的时空演化特征,因此,全面收集并分析了覆盖整个区域的影像。其中ALOS卫星于2006-01-24发射升空,于2011-04-22停止运行;Sentinel-1A卫星于2014-04-03发射,并持续运行至今。本文使用的影像包括2007-09-27—2010-08-20期间的7景ALOS PALSAR影像,以及2015-12-17—2023-05-31期间的184景Sentinel-1A升轨影像和2015-12-27—2023-05-19期间的288景Sentinel-1A降轨影像。为减少地形相位对干涉测量结果的影响,并对形变结果进行地理编码,本文采用了30 m分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission,SRTM)高程数据作为外部地形数据。同时,结合土地利用和降水等外部数据,进一步探讨了地面沉降的驱动因素,数据详细参数见表1和表2。

表1　数据来源

Table 1　Data Source

数据类型	机构及来源
ALOS PALSAR, Sentinel-1A	欧洲航天局, https://search.asf.alaska.edu/
数字高程模型	美国航空航天局, https://earthexplorer.usgs.gov/
土地利用	中国科学院空天信息创新研究院, https://zenodo.org/records/4280923
降雨	美国航空航天局,https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_GPM_L3_IMERG_V07

表2　影像数据参数

Table 2　Image Data Parameters

数据类型	轨道方向及轨道号	波段	极化模式	平均入射角/(°)	平均飞行方位角/(°)
ALOS PALSAR	升轨/470	L	HH	38.74	－10.13
Sentinel-1A	升轨/55	C	VV	39.50	－13.10
	降轨/62			39.17	193.16

2.2　SBAS-InSAR

图2展示了基于InSAR时序形变监测研究白草塬地面沉降的技术路线图。由于在2007—2023年期间,随着白草塬农业经济的快速发展,合适的永久性散射点难以找到,为获取更可靠、更精确的地面沉降监测结果,本文采用了SBAS-InSAR技术[25]。SBAS-InSAR技术是一种基于多主影像的InSAR时间序列分析方法,其目的是将所有参与干涉的SAR影像分成多个小基线集,并利用奇异值分解方法获得最小二乘解[26-27]。

在利用SBAS-InSAR技术进行时间序列分析之前,首先使用传统InSAR方法生成干涉图,主要处理步骤包括单视复数影像(single look complex,SLC)数据导入、SAR影像配准、差分干涉、相位解缠和地理编码[20, 28]。在生成缠绕干涉图后,采用自适应滤波技术以提高干涉图的信噪比,从而增强后续分析的有效性。为确保解缠结果的可靠性,在解缠过程中设置的相干性阈值为0.3,以过滤掉低相干性区域的干扰。在进行

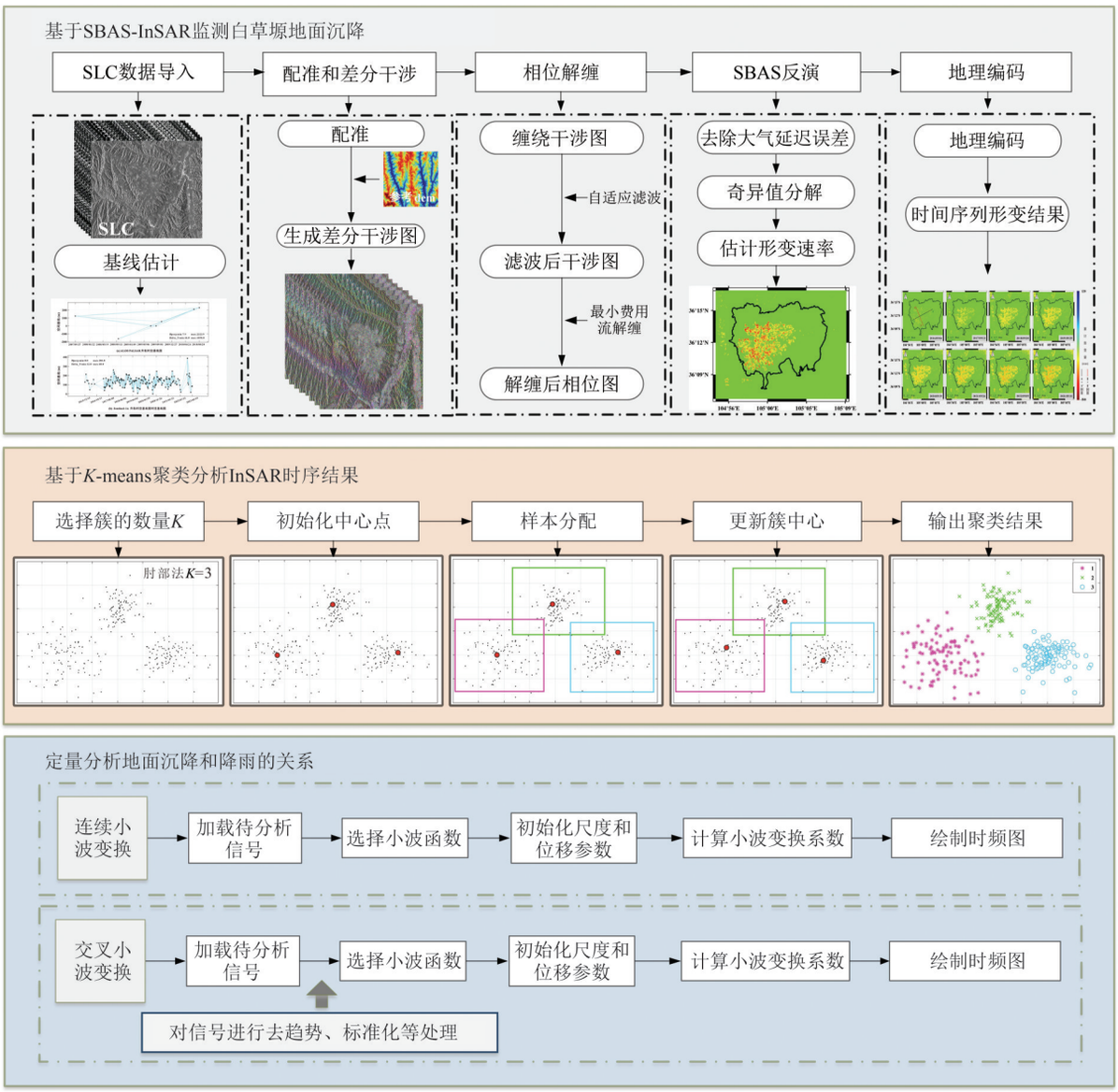


图2 技术路线图

Fig. 2 Technical Roadmap

SBAS分析之前,还进行了通用大气改正在线服务大气改正,以消除大气对干涉相位的干扰,进一步提高监测的准确性和可靠性。

SBAS-InSAR的处理步骤如下:首先假设按照一定的时间顺序($t_0, t_1, t_2, \cdots, t_N$)获取同一区域的$N+1$幅SAR影像,选取一景作为主影像,然后根据设定的时空基线与干涉配对原则生成M对干涉对,生成差分干涉图。本文设置ALOS PALSAR数据的时间基线为1 500 d,空间基线为2 500 m;Sentinel-1A数据的时间基线为60 d,空间基线为500 m,如图3所示。

M满足以下关系:

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

此时,差分干涉图中每个像素的干涉相位可表示为:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_A - \varphi_B \approx \Delta\varphi^i_{\mathrm{def}} + \Delta\varphi^i_{\varepsilon} + \Delta\varphi^i_{\alpha} + \Delta\varphi^i_{\mathrm{noi}} \tag{2}$$

式中,φ_A、φ_B分别为第i幅差分干涉图在A、B时刻获取的SAR影像的相位;$\Delta\varphi^i_{\mathrm{def}}$为$t_B$至$t_A$时刻对应的斜距向上的形变;$\Delta\varphi^i_{\varepsilon}$为地形相位误差;$\Delta\varphi^i_{\alpha}$为大气相位误差;$\Delta\varphi^i_{\mathrm{noi}}$为噪声相位误差。

2.3 二维形变速率分解

由于SAR卫星在近极地轨道上运行,且SAR卫星多数为侧视成像,因此单一的升轨或降轨影像所获得的形变结果并不能真实反映地表的实际形变,而是三维形变在视线方向(line of sight, LOS)上的投影[29]。此外,SAR卫星的几何关系使其对南北方向的形变并不敏感。在假设南北向形变为0的前提下,可以将升轨和降轨解算的LOS向形变分解为东西向形变和垂直向

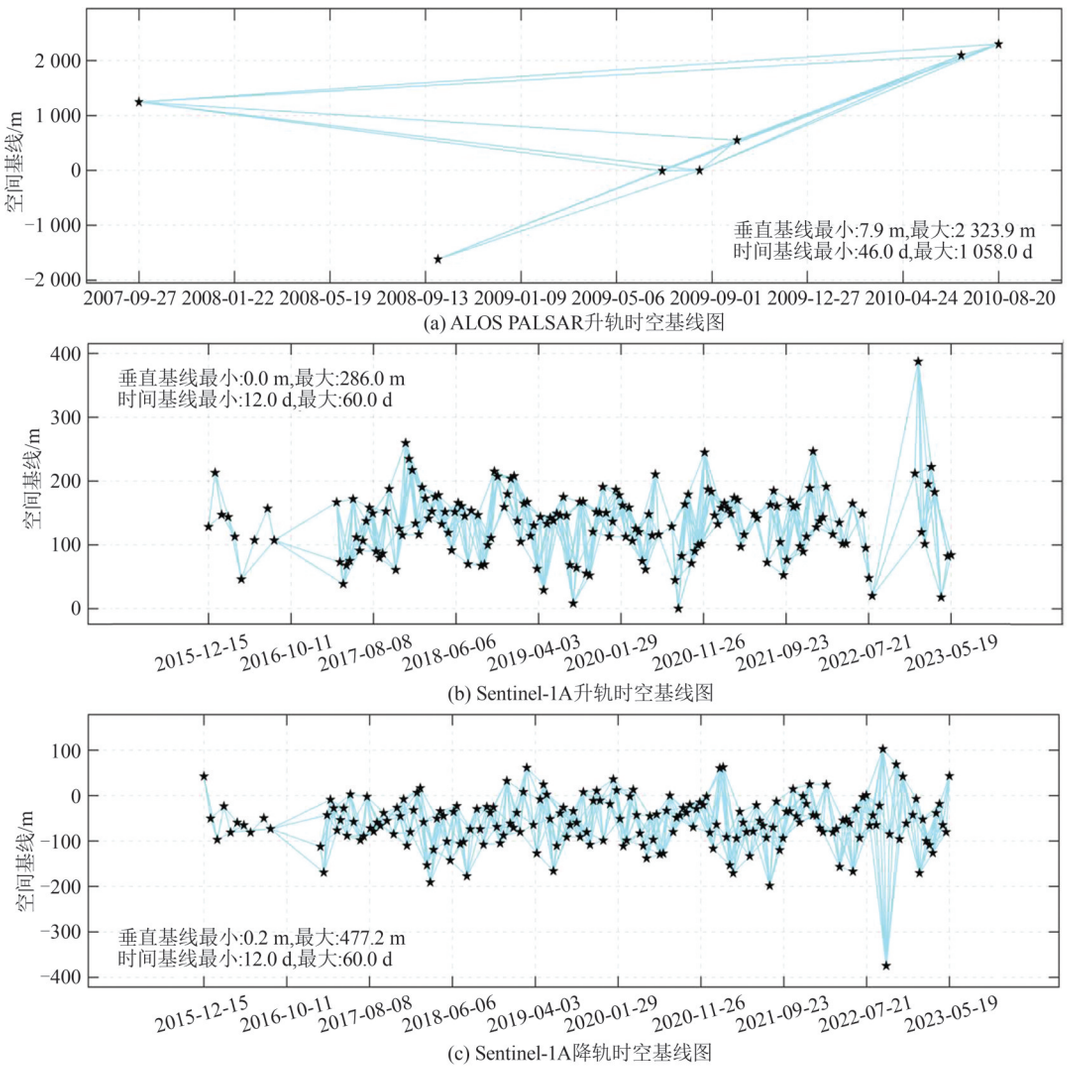


图 3　SBAS-InSAR 时空基线图

Fig. 3　SBAS-InSAR Spatiotemporal Baseline Diagrams

形变[30]:

$$\begin{bmatrix} -\cos\alpha^{asc}\sin\theta^{asc} & \cos\theta^{asc} \\ -\cos\alpha^{desc}\sin\theta^{desc} & \cos\theta^{desc} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} D_E \\ D_U \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} D_{LOS}^{asc} \\ D_{LOS}^{desc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,D_{LOS}^{asc} 和 D_{LOS}^{desc} 分别表示升轨和降轨的 LOS 向形变;D_E 和 D_U 分别表示东西向和垂直向形变;α^{asc} 和 θ^{asc} 分别表示 Sentinel-1 升轨影像的方位角和入射角;α^{desc} 和 θ^{desc} 分别表示 Sentinel-1 降轨影像的方位角和入射角。

2.4　*K*-means聚类方法

聚类分析作为一种无监督学习方法,在时序形变结果的再分析中得到了广泛应用[31-32]。该方法可以从复杂的形变信号中分离出具有实际意义的长期形变信号,消除周期性信号的干扰,这对识别和评估地面沉降现象具有重要的意义[33]。

本文采用 *K*-means 聚类算法进行形变时间序列分析,该算法的目标是将数据集划分为 K 个簇,使得每个簇内的数据点与其对应的簇中心之间的距离之和最小[21]。*K*-means 算法的具体步骤如下:

1)选择初始中心。随机选择 K 个数据点作为初始的簇中心,或根据数据的分布特征选择初始簇中心。

2)分配数据点。将每个数据点分配到最近的簇中心所代表的簇中。需要说明的是,“最近”的定义通常是基于欧氏距离。

3)迭代优化。重复步骤 2)和 3),直到簇中心不再发生显著变化,或者达到预设的迭代次数。

4)评估聚类效果。使用轮廓系数等指标评估聚类效果。

以数据集 $D=\{x_1,x_2,\cdots,x_m\}$ 为例,假设可以将其划分为 k 簇,使得 $C=\{c_1,c_2,\cdots,c_k\}$,则 k 个簇满足下式:

$$S=\sum_{x\in c_k}(x-\mu_i)^2 \quad (4)$$

式中,S表示误差平方和;μ是第i簇的均值。误差平方和S越小,簇内的相似度越高。因此,确定最优的聚类数量是聚类分析中的关键问题。本文采用了肘部法[21]来确定最优的聚类数量。肘部法通过计算不同聚类数量下的聚类内方差或轮廓系数等指标,寻找指标变化的"肘点",即指标突然下降的点,这个点通常被认为是最优的聚类数量。经过分析,本文确定4组作为最优的聚类数量。

2.5 小波变换

小波变换是一种强大的信号分析工具,能够在时频空间同时观察信号的时间和频率特性[34]。连续小波变换可以揭示信号在不同尺度和位置上的时频表示。在研究地面沉降运动过程中,连续小波变换能够识别位移时间序列$x(t)$在时频空间中的局部间歇周期性[35]:

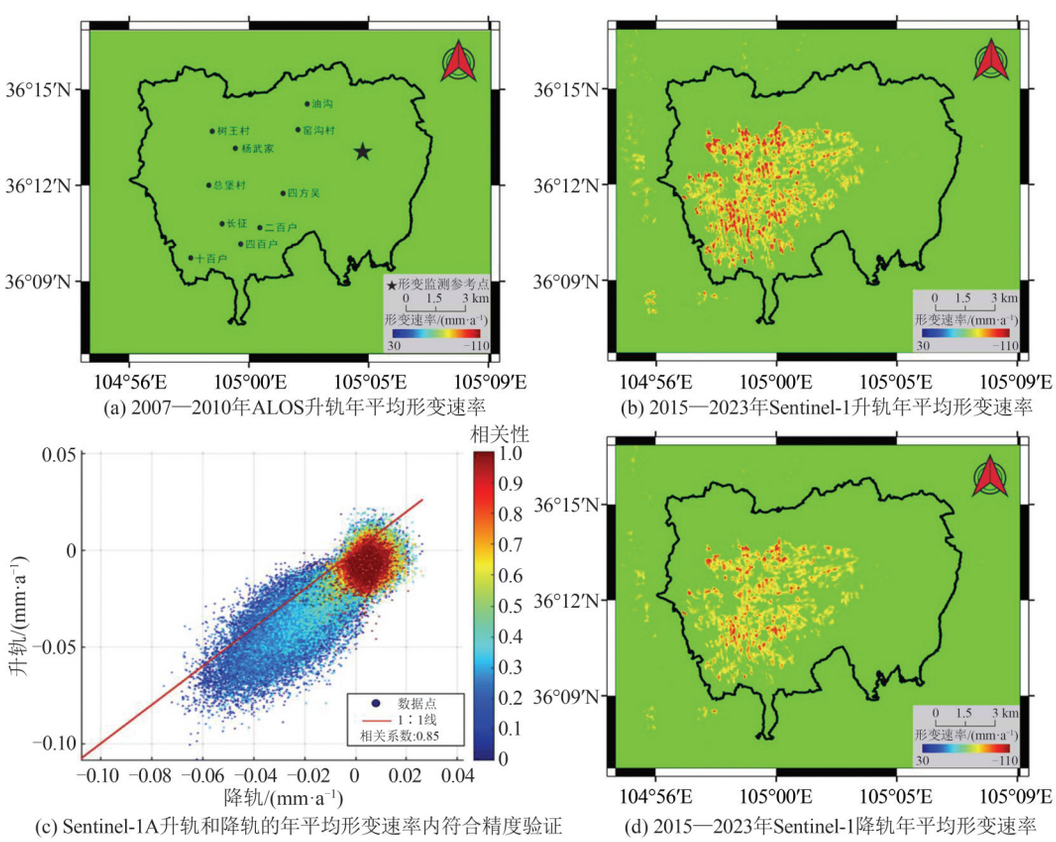
$$W_x=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\varphi^*(t)\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中,φ表示由高斯函数调制的平面波,以揭示局部周期性的特征;*表示复共轭。交叉小波变换和小波相干性分别用于分析两个时间序列的共同功率和相位关系,从而探索二者之间的潜在联系。

3 时序InSAR结果

3.1 地面沉降空间分布特征

利用SBAS-InSAR技术对2007-09—2023-05期间覆盖白草塬的影像数据进行干涉处理,得到长时间序列的地表形变特征信息。在处理过程中,参考点设定在白草塬东侧区域(图4(a)),该区域耕地面积较少,无明显形变,因此认为其相对稳定。2007—2010年期间的年平均形变速率为−17~0 mm/a;而在2015—2023年间,Sentinel-1升轨获取的年平均形变速率为−110~22 mm/a(图4(b)),降轨获取的年平均形变速率为−84~30 mm/a(图4(d)),升轨和降轨数据的相关性达到了0.85,二者具有较强的正相关性(图4(c))。其中,正值的形变速率表示地表朝向卫星运动,负值的形变速率则表示地物远离卫星运动。



(a) 2007—2010年ALOS升轨年平均形变速率

(b) 2015—2023年Sentinel-1升轨年平均形变速率

(c) Sentinel-1A升轨和降轨的年平均形变速率内符合精度验证

(d) 2015—2023年Sentinel-1降轨年平均形变速率

注:负值表示地面沉降,正值表示地面抬升。

图4 白草塬地表年平均形变速率

Fig. 4 Annual Ground Surface Average Deformation Velocity Rate of Baicaoyuan

根据2007—2010年的ALOS影像处理结果,白草塬未出现显著变形,99.5%的面积年形变速率小于15 mm/a,大于15 mm/a的形变面积仅为0.81 km^2,占总面积的0.5%,该地区在此期间基本处于稳定状态。对2015—2023年期间的Sentinel-1A升轨影像进行处理,结果显示白草塬地区

出现了显著的形变信号。在此期间,年形变速率大于 15 mm/a的面积增至 50.37 km^2,占总面积的 28.8%。其中,形变速率超过 40 mm/a的区域面积达到 14.92 km^2,占总面积的 8.5%。这些数据表明,白草塬地区在过去几年中经历了显著的地表形变,且形变速率较高。进一步分析降轨影像获取的年形变速率,发现白草塬地区年形变速率大于 15 mm/a的面积为 45.61 km^2,占总面积的 26.1%;形变速率超过 40 mm/a的面积为 5.73 km^2,占总面积的 3.3%。这些结果与升轨影像处理结果基本一致,进一步表明白草塬地区在 2015—2023 年经历了大面积的地面沉降。

按照式(3)获取白草塬东西向和垂直向的形变,发现该地区 2015—2023 年东西向形变速率为 −21～63 mm/a,垂直向形变速率为 −110～21 mm/a,如图 5 所示,形变场空间分布与 LOS 向获取的形变速率相一致。由于本文主要研究白草塬地区的地面沉降,东西向形变对地面沉降的影响较小,因此后续的地表形变分析将主要集中在垂直向形变。

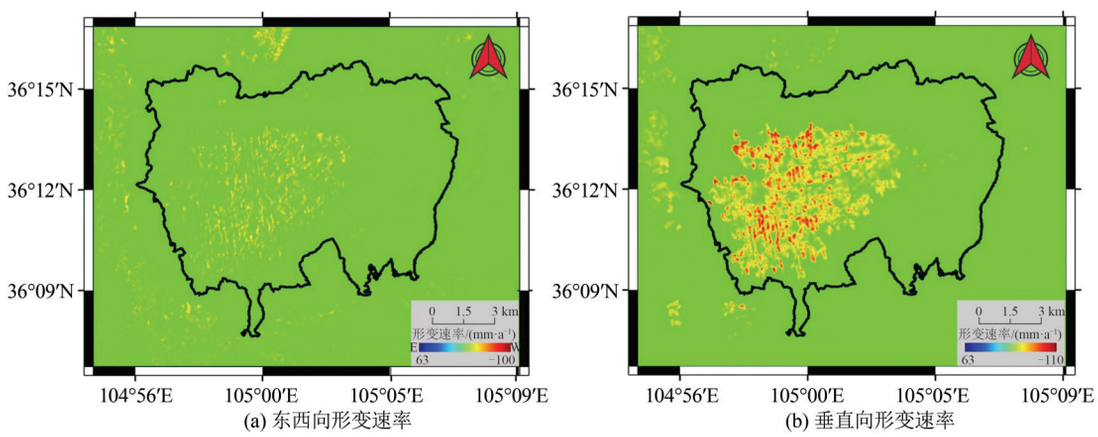


图 5　2015—2023 年期间白草源二维形变速率分解

Fig. 5　Two-Dimensional Deformation Velocity Rate Decomposition of Baicaoyuan from 2015 to 2023

3.2　地面沉降演化特征

3.2.1　土地利用空间演化特征分析

通过对覆盖白草塬地区的多期历史 Google Earth 光学影像进行分析,可以明显观察到该地区的城镇建设和土地利用变化。从 2007—2023 年期间白草塬地区新增不透水面的空间分布如图 6 所示。从影像中可以清楚地观察到,随着时间的推移,白草塬地区的城镇建设显著扩张,尤其是不透水面的面积逐渐扩大。这些不透水面主要包括蓄水池和少数建筑房屋,其中蓄水池占据了重要地位。蓄水池通常用于灌溉、储水和农作物养殖,它们的建设和扩展会引发地下水位变化或土壤压实,从而影响地表的稳定性并导致地面沉降。通过对历史影像的解译,发现这些蓄水池是在 2020-05—2021-11 期间逐步建立的,与引洮工程灌溉活动密切相关。

3.2.2　地面沉降时间演化特征分析

为进一步分析白草塬地区地面沉降的时间演化特征,采用 SBAS-InSAR 技术获取了白草塬的时序形变信息。研究结果表明,2007—2010 年期间,该地区的累积形变量相对较小,整体较为稳定。然而,2016-09-04—2023-05-31 的形变结果展示出持续沉降现象(图 7)。根据历史资料[10],这一沉降现象可能与 2014-12 引洮工程一期通水有关。

引洮工程作为一项垮流域的重大水利工程,旨在改善当地的生态环境和提高水资源利用效率。随着工程的实施,监测结果显示,2016-09-04—2023-05-31 期间,白草塬地区呈现出连续沉降现象,这种沉降现象可认定与引洮工程的水文地质效应有直接关联。大规模的引水活动往往会影响地下水位,导致地表沉降。特别是在地质结构复杂的白草塬地区,这种影响可能会更加明显,甚至会加剧地面沉降的现象。为进一步分析沉降情况,图 8 展示了 A-A'和 B-B'剖面的形变量变化。剖面 A-A'显示,在监测期内,整体沉降趋势明显,尤其在 2016—2023 年期间,沉降量达到约 −0.4 m。剖面 B-B'也呈现出类似的沉降趋势,尽管其沉降幅度略小,但仍可见到随着时间的推移,地表形变量在多个年份间存在波动,尤其在 2019 年和 2021 年期间,沉降现象显著。此外,图 8(a)显示剖面 A-A'的高程相对稳定,但图 8(b)中剖面 B-B'两侧具有一定坡度的区域沉降量小于中间平台区的沉降量,表明该区域沉降变化与高程因素存在一定关联,沉降更多集中于台塬顶面而非两侧坡体。

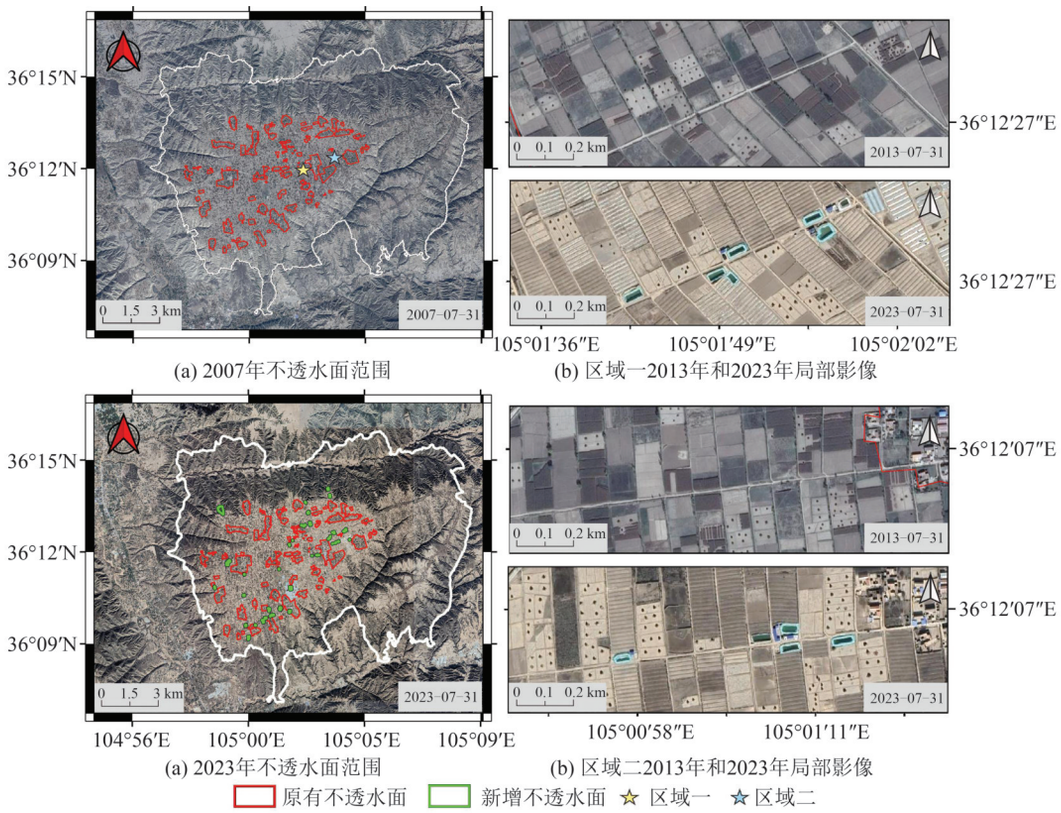


图6 2007—2023年白草塬不透水面的空间变化

Fig. 6 Spatial Variation of Impervious Surfaces in Baicaoyuan from 2007 to 2023

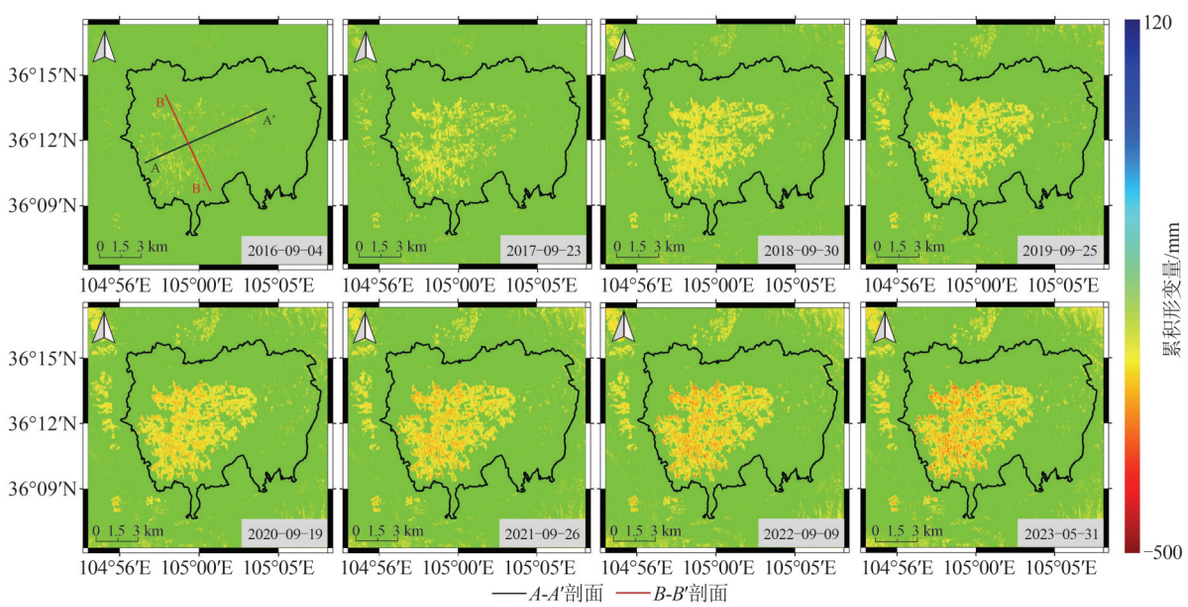


图7 2015—2023年累积形变图

Fig. 7 Cumulative Deformation Maps from 2015 to 2023

3.3 *K*-means聚类分析

通过对InSAR二维时间序列进行聚类分析，本文将白草塬地区的地面沉降趋势分为了4个不同的类，这些类别在时间变化上表现出明显差异。根据图9中二维变形族的分析结果，可以观察到，白草塬区域的西侧显示出明显的沉降趋势，而抬升区域则主要集中在沉降区域的周围。在这4个聚类中，簇2显示出最大的沉降斜率，对应图9二维变形族中的红色区域，该区域面积为14.66 km^2，2015-12—2023-05期间，该区域累积沉降量达25 cm。簇1对应于二维变形族中的黄色区域，面积为34.28 km^2，在相同的时间段内，累积沉降量为11 cm。虽然沉降量小

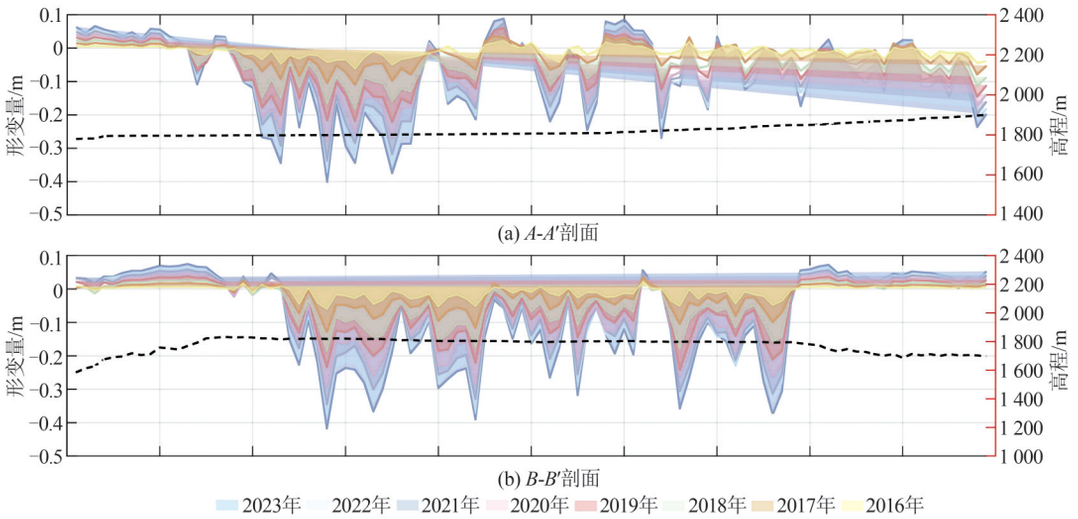


图 8　地面沉降剖面图

Fig. 8　Land Subsidence Profiles

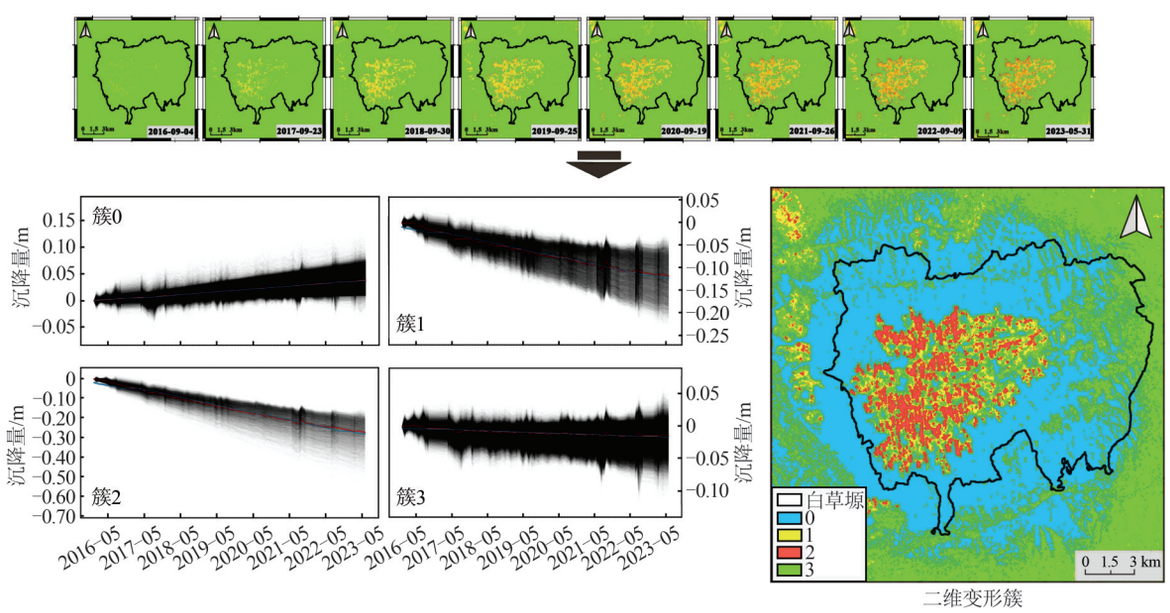


图 9　SBAS-InSAR 二维时间序列聚类分析

Fig. 9　SBAS-InSAR Two-Dimensional Time-Series Clustering Analysis

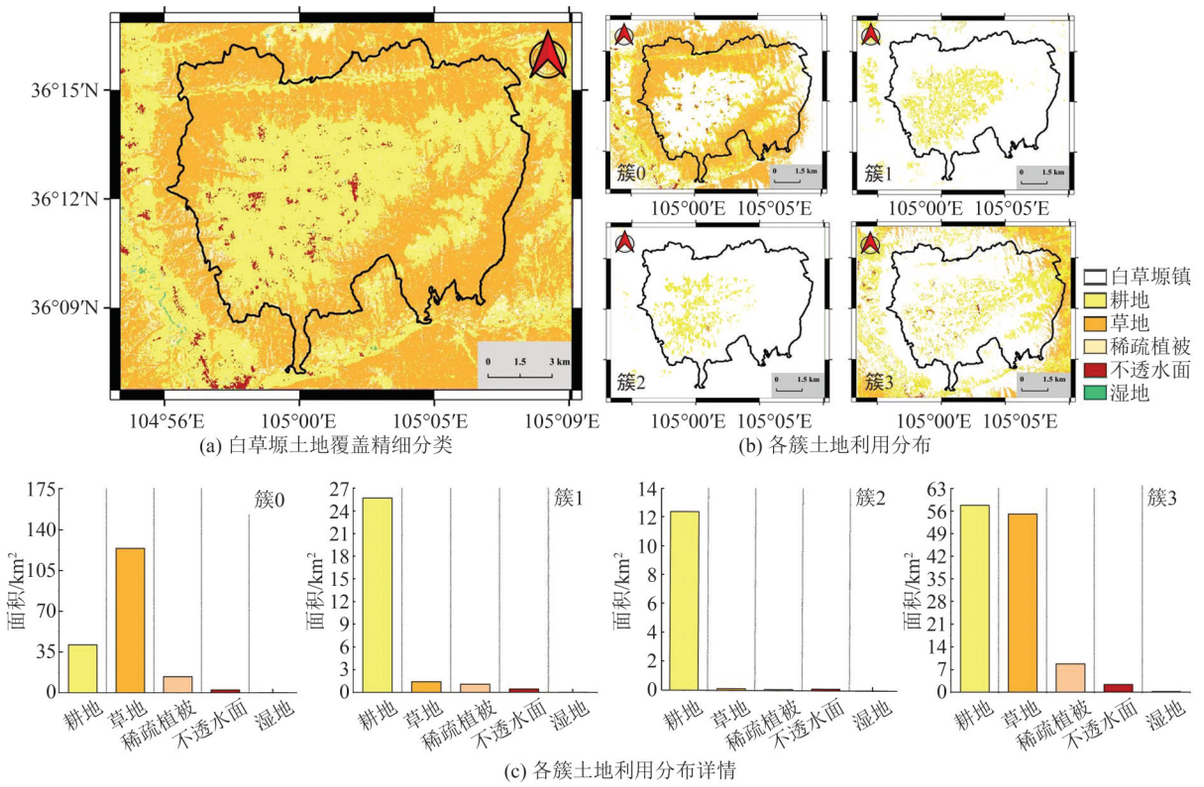
于簇 2,但仍然表现出明显的沉降趋势。簇 3 几乎没有沉降斜率,主要表现为周期性波动,对应二维变形族中的绿色区域,面积为 158.70 km^2。簇 0 对应二维变形族中的蓝色区域,面积为 207.56 km^2,在 2015-12—2023-05 期间,该区域累积抬升 5 cm,抬升幅度较小。

4　讨　论

4.1　地面沉降与土地利用的关系

根据 GLC_FCS30-2020 全球土地覆盖精细分类系统对白草塬的土地覆盖分布分析结果(图 10(a)),白草塬的主要地表覆盖类型包括耕地、草地、稀疏植被、不透水表面覆盖和湿地,该结果与 Google Earth 光学影像识别出的土地覆盖情况一致。

如图 10(b)和 10(c)所示,对 4 个簇的土地覆盖类型分别进行分析。其中,簇 0 的主要土地覆盖类型包括草地、耕地、稀疏植被、不透水面,其中草地、耕地及稀疏植被占据了主导地位,占地面积分别为 123.86 km^2、41.19 km^{2}和 13.85 km^2,分别占簇 0 总面积的 68.3%、22.7%和 7.6%。簇 1 保留了与簇 0 相似的土地覆盖结构,不同之处在于簇 1 中耕地占地面积最大,为 25.69 km^2,占簇 1 面积的 89.8%,其余类型较簇 0 有所减少,其他类型总面积为 2.93 km^2。反映了簇 1 区域在土地利用上的差异及地理位置的影响。在簇 2 分析中,



(a) 白草塬土地覆盖精细分类 (b) 各簇土地利用分布

(c) 各簇土地利用分布详情

图10 各簇土地覆盖分布

Fig. 10 Land Cover Distribution of Each Cluster

其主要的土地覆盖类型主要为耕地覆盖,占地面积为12.39 km²,占簇2总面积的97.6%,其他类型总面积为0.3 km²。这表明簇2区域的土地利用的单一化。簇3展示了与簇0相似的复杂土地利用结构,耕地和草地再次占据主导地位,占地面积分别为57.75 km²和55.09 km²,分别占簇3总面积的46.5%和44.4%,其他类型为稀疏植被、不透水面及湿地,共计占地面积为11.24 km²,总面积占比为9.1%。

综上所述,白草塬地区的地面沉降现象与耕地覆盖区域密切相关,92.2%的地面沉降集中在耕地区域。结合地面沉降的时空分布特征,可以推测这些地面沉降现象与农业灌溉活动相关,农业活动尤其是大规模灌溉,会导致地下水位变化,进而引发土壤压实和地面沉降。

4.2 地面沉降与降雨的关系

降雨会直接影响土壤的水分条件,导致土壤饱和度增加,进而引发土壤体积变化,从而影响地表的形变。对于白草塬地区的地面沉降,通过交叉小波变换分析显示(图11),日降雨量与地表形变在2018-06—2020-01存在一定的相关性,其余时间相关性并不明显(图11(d))。因此,本文认为白草塬地区的地面沉降与引洮工程的关系更为密切,与降雨的关系相对较小。在评估白草塬地区的地面沉降时,应更多地关注引洮工程、水文条件和其他地质因素之间的复杂相互作用,以便更全面地理解地面沉降的风险和成因。

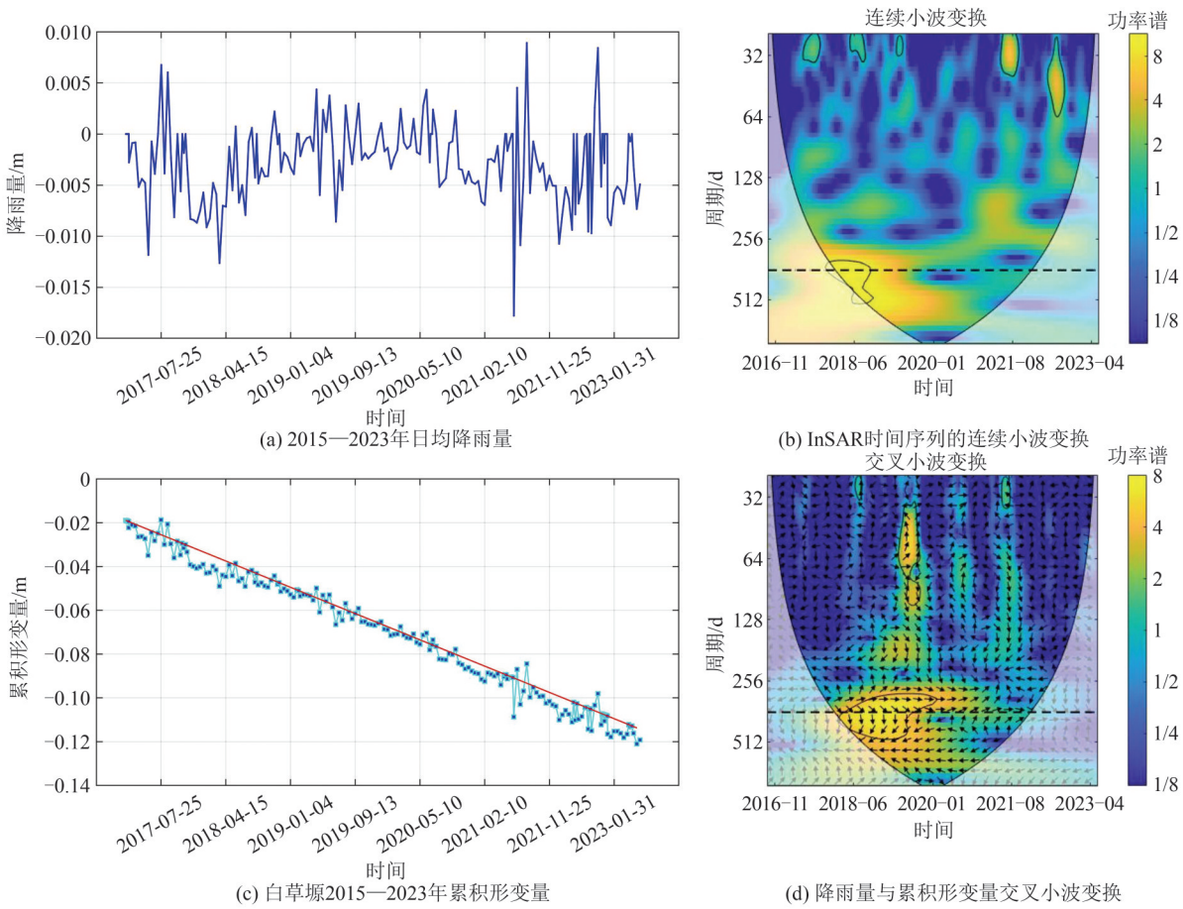
5 结 语

本文选取479景C波段和L波段SAR影像,利用SBAS-InSAR技术,获取了黄土高原白草塬区域的地表形变速率,结合*K*-means聚类分析和小波变换进一步分析了白草塬区域地面沉降的原因,得到的主要结论如下:

1)白草塬地区在2007—2010年间的平均形变速率为-17~0 mm/a,引洮工程通水后地面沉降显著加剧,2015—2023年间,年平均形变速率增加至-110~30 mm/a。

2)通过*K*-means聚类分析,将白草塬地区的地表形变分为簇0、簇1、簇2和簇3四类,结合土地覆盖信息,发现地表沉降主要集中在耕地覆盖区域,与农业灌溉活动密切相关。

3)交叉小波变换分析表明,降雨量与形变量之间的关系不显著,引洮工程通水灌溉是地面沉降的首要因素。



(a) 2015—2023年日均降雨量　(b) InSAR时间序列的连续小波变换

(c) 白草塬2015—2023年累积形变量　(d) 降雨量与累积形变量交叉小波变换

图 11　白草塬时序地面沉降与日降雨之间的关系

Fig. 11　Relationship Between Time-series Ground Subsidence and Daily Rainfall of Baicaoyuan

参　考　文　献

[1] COSTANTINI M, FERRETTI A, MINATI F, et al. Analysis of Surface Deformations over the Whole Italian Territory by Interferometric Processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed Radar Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 250-275.

[2] 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.
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.

[3] 何佳阳，巨能攀，解明礼，等. 高山峡谷地区地质灾害隐患 InSAR 识别技术对比[J]. 地球科学，2023，48(11)：4295-4310.
HE Jiayang, JU Nengpan, XIE Mingli, et al. Comparison of InSAR Technology for Identification of Hidden Dangers of Geological Hazards in Alpine and Canyon Areas[J]. *Earth Science*, 2023, 48(11): 4295-4310.

[4] 李振洪，朱武，余琛，等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报，2023，52(11)：1805-1834.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development Status and Trends of Imaging Geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11): 1805-1834.

[5] 蒲川豪，许强，蒋亚楠，等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序 InSAR 监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2020，45(11)：1728-1738.
PU Chuanhao, XU Qiang, JIANG Ya'nan, et al. Analysis of Land Subsidence Distribution and Influencing Factors in Yan'an New District Based on Time Series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1728-1738.

[6] 罗祎沅，许强，蒋亚楠，等. 基于时序 InSAR 与机器学习的大范围地面沉降预测方法[J]. 地球科学，2024，49(5)：1736-1745.
LUO Huiyuan, XU Qiang, JIANG Ya'nan, et al. The Prediction Method of Large-Scale Land Sub-

sidence Based on Multi-Temporal InSAR and Machine Learning[J]. *Earth Science*, 2024, 49(5): 1736-1745

[7] 李达, 邓喀中, 高晓雄, 等. 基于SBAS-InSAR的矿区地表沉降监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10): 1531-1537.
LI Da, DENG Kazhong, GAO Xiaoxiong, et al. Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Mining Area Based on SBAS-InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1531-1537.

[8] 张子彦, 张敬凯, 张豪磊, 等. 南水北调中线焦作采空区地表沉降DS-InSAR监测与风险分析[J]. 遥感学报, 2024, 28(4): 900-910.
ZHANG Ziyan, ZHANG Jingkai, ZHANG Haolei, et al. Monitoring and Risk Analysis of Surface Subsidence in the Jiaozuo Goaf Along the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project Based on the DS-InSAR Method[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(4): 900-910.

[9] 陈毅, 何毅, 张立峰, 等. 长短时记忆网络TS-InSAR地表形变预测[J]. 遥感学报, 2022, 26(7): 1326-1341.
CHEN Yi, HE Yi, ZHANG Lifeng, et al. Surface Deformation Prediction Based on TS-InSAR Technology and Long Short-Term Memory Networks [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(7): 1326-1341.

[10] 黄亚楠, 林国伟, 李志. 黄土高原白草塬土地利用变化对地下水补给的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 250-255.
HUANG Yanan, LIN Guowei, LI Zhi. Impacts of Changes in Land Use on Groundwaterrecharge on Baicao Loess Tableland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 250-255.

[11] 吴玮江, 王武衡, 冯学才, 等. 干旱区农业灌溉引起的地质灾害及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(4): 61-66.
WU Weijiang, WANG Wuheng, FENG Xuecai, et al. Prevention Countermeasures of Geological Hazards Caused by Agricultural Irrigation in Semi Arid Area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1999, 10(4): 61-66.

[12] 王军德, 刘德地, 程玉菲, 等. 引洮工程受水区径流演变规律分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(6): 553-564.
WANG Junde, LIU Dedi, CHENG Yufei, et al. Analysis of Runoff Variation Law in the Water Receiving Area of Yintao Water Transfer Project[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2023, 12(6): 553-564.

[13] 史绪国, 张路, 许强, 等. 黄土台塬滑坡变形的时序InSAR监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1027-1034.
SHI Xuguo, ZHANG Lu, XU Qiang, et al. Monitoring Slope Displacements of Loess Terrace Using Time Series InSAR Analysis Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1027-1034.

[14] 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列InSAR分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别: 以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2039-2049.
ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry—A Case Study of Danba, Sichuan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2039-2049.

[15] CHEN B, LI Z H, SONG C, et al. Automatic Detection of Active Geohazards with Millimeter-to-Meter-Scale Deformation and Quantitative Analysis of Factors Influencing Spatial Distribution: A Case Study in the Hexi Corridor, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 131: 103995.

[16] 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): 2375-2383.

[17] LANARI R, MORA O, MANUNTA M, et al. A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1377-1386.

[18] ZHANG P, GUO Z H, GUO S F, 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): 3265.

[19] ZHANG Z H, HU C T, WU Z H, et al. Monitoring and Analysis of Ground Subsidence in Shanghai Based on PS-InSAR and SBAS-InSAR Technologies[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 8031.

[20] LI S W, XU W B, LI Z W. Review of the SBAS InSAR Time-Series Algorithms, Applications, and Challenges[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2022, 13(2): 114-126.

[21] WANG G Y, LI P, LI Z H, et al. InSAR and Ma-

chine Learning Reveal New Understanding of Coastal Subsidence Risk in the Yellow River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 915: 170203.

[22] 王玉山. 浅谈白草塬高扬程灌区工程[J]. 甘肃农业, 2005(3): 93.
WANG Yushan. Discussion on High-Lift Irrigation Project in Baicaoyuan[J]. *Gansu Agriculture*, 2005(3): 93.

[23] 段旭, 董琪, 门玉明, 等. 黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1753-1758.
DUAN Xu, DONG Qi, MEN Yuming, et al. Change of Groundwater and Water Content of Loess High Fill in Gully Regions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(9): 1753-1758.

[24] 杨清雯. 引洮供水工程 民生工程托起幸福新生活[J]. 中国水利, 2022(19): 100-101.
YANG Qingwen. Water Diversion Project from Tao River and People's Livelihood Project Hold up a Happy New Life [J]. *China Water Resources*, 2022(19): 100-101.

[25] CHEN G, ZHANG Y, ZENG R Q, et al. Detection of Land Subsidence Associated with Land Creation and Rapid Urbanization in the Chinese Loess Plateau Using Time Series InSAR: A Case Study of Lanzhou New District[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 270.

[26] 王之栋, 文学虎, 唐伟, 等. 联合多种 InSAR 技术的龙门山-大渡河区域地灾隐患早期探测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 451-459.
WANG Zhidong, WEN Xuehu, TANG Wei, et al. Early Detection of Geological Hazards in Longmenshan-Dadu River Area Using Various InSAR Techniques [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 451-459.

[27] 戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1778-1786.
DAI Keren, ZHUO Guanchen, XU Qiang, et al. Tracing the Pre-Failure Two-Dimensional Surface Displacements of Nanyu Landslide, Gansu Province with Radar Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1778-1786.

[28] TIZZANI P, BERARDINO P, CASU F, et al. Surface Deformation of Long Valley Caldera and Mono Basin, California, Investigated with the SBAS-InSAR Approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 277-289.

[29] 王勇, 陈岩, 王沛, 等. 升降轨融合的施工区域 InSAR 地表形变监测[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(5): 487-490.
WANG Yong, CHEN Yan, WANG Pei, et al. Surface Deformation Monitoring of Construction Area Based on InSAR Technology[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(5): 487-490.

[30] 朱智富, 甘淑, 袁希平, 等. 融合升降轨 InSAR 数据的东川区滑坡隐患识别[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(1): 137-146.
ZHU Zhifu, GAN Shu, YUAN Xiping, et al. Identification of Potential Landslides in Dongchuan District by Integrating InSAR Data of Ascending and Descending Orbits [J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(1): 137-146.

[31] FESTA D, NOVELLINO A, HUSSAIN E, et al. Unsupervised Detection of InSAR Time Series Patterns Based on PCA and *K*-means Clustering[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 118: 103276.

[32] YAN H N, DAI W J, XU W B, et al. A Method for Correcting InSAR Interferogram Errors Using GNSS Data and the *K*-means Algorithm [J]. *Earth, Planets and Space*, 2024, 76(1): 51.

[33] GUO X X, ZHAO C Y, LI G R, et al. A Multifactor-Based Random Forest Regression Model to Reconstruct a Continuous Deformation Map in Xi'an, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(19): 4795.

[34] DU J T, LI Z H, SONG C, et al. InSAR-Based Active Landslide Detection and Characterization Along the Upper Reaches of the Yellow River[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 3819-3830.

[35] 唐伟, 赵祥君, 康彩琴, 等. 太原盆地地面沉降时序 InSAR 监测与季节性变形小波分析[J]. 地球物理学报, 2023, 66(6): 2352-2369.
TANG Wei, ZHAO Xiangjun, KANG Caiqin, et al. Monitoring Land Subsidence by Time Series InSAR and Wavelet Analysis of Seasonal Deformation in Taiyuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(6): 2352-2369.