

基于SBAS-InSAR的东营市地表形变监测

李 勇, 吴仁哲, 段金亮, 邓雄伟

西南交通大学, 四川 成都
Email: 18661361156@163.com

收稿日期: 2021年4月7日; 录用日期: 2021年4月19日; 发布日期: 2021年4月26日

摘 要

东营市位于山东省北部黄河三角洲地区, 地表沉积层的自然压实、地下资源的开发以及城市建设等活动会导致该地区的地表沉降, 严重区域的形变速率可达 -100 mm/yr, 对城市基础设施和人员安全造成潜在危害。为了实现对东营市的地表形变监测, 该文采用Sentinel-1B数据进行监测。本文利用84景Sentinel-1B数据, 运用短基线集(Small Baseline Subsets InSAR, SBAS-InSAR)技术获取了东营市2016年9月至2019年9月的地表形变特征, 并结合相关资料分析了主要沉降漏斗的沉降原因。实验结果表明, 东营市在近海沿岸地区有两个显著的沉降中心, 平均沉降速率分别为 9.3 cm/yr和 10.5 cm/yr, 且最大沉降量均超过了 50 cm, 联合多源要素分析得知地下卤水的抽取是导致该地区沉降的主要原因。

关键词

东营市, 地表沉降, SBAS-InSAR, 成因分析

Surface Deformation Monitoring in Dongying City Based on SBAS-InSAR

Yong Li, Renzhe Wu, Jinliang Duan, Xiongwei Deng

Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan
Email: 18661361156@163.com

Received: Apr. 7th, 2021; accepted: Apr. 19th, 2021; published: Apr. 26th, 2021

Abstract

Dongying City is located in the Yellow River Delta in the north of Shandong Province. The natural compaction of surface sediments, the development of underground resources and urban construction activities will lead to the surface subsidence in this area, and the deformation rate in serious areas can reach -100 mm/yr, causing potential hazards to the safety of urban infrastructure and

personnel. In order to monitor the surface deformation of Dongying City, this paper uses Sentinel-1B data to monitor the surface deformation. In this paper, the surface deformation characteristics of Dongying City from September 2016 to September 2019 were obtained by using the 84-view Sentinel-1B data and the Small Baseline Subsets (SBAS) technique, and the subsidence causes of the main subsidence funnel were analyzed in combination with the relevant data. The experimental results show that there are two significant settlement centers in the coastal area of Dongying City, with average settlement rates of 9.3 cm/yr and 10.5 cm/yr respectively, and the maximum settlement amount both exceeds 50 cm. Combined with multi-source factor analysis, it is concluded that the extraction of underground brine is the main reason for the settlement in this area.

Keywords

Dongying City, Surface Subsidence, SBAS-InSAR, Cause Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地表沉降是指地壳表层在自然活动或人类活动的作用下,因受力不均发生压缩,从而导致区域地表发生下陷的现象[1]。东营市位于山东省北部黄河三角洲地区,濒临渤海,海拔极低,地表沉降会造成该地区大面积的土地被淹没,威胁生态环境,破坏城市建设,甚至会对人民的生命和财产安全构成巨大威胁,因此对该地区进行实时的地表沉降监测是十分必要的。

时序 InSAR 技术具备全天时、全天候、低成本、高时间分辨率、高空间分辨率、高精度的特性[2] [3],近年来,我国也开展了一些 InSAR 方面的研究[4],同时有不少学者将其应用到东营市的地面沉降的监测研究中。2015年,张金芝[5]等人利用 PS-InSAR 技术,采用 10 景 ERS 数据对东营地区的地表情况进行了监测,得到东营东城区与西城区在 1992~1995 年的平均形变速率;2016年,刘鹏[6]等人利用 StaMPS 技术获取到东营市在 1992 年~1996 年和 2003 年~2008 年两个阶段的地表形变等特征,发现该地区存在每年 15 mm 以上的地表沉降,且沉降活动与油田开采活动有关;2018年,李乃一[7]等利用 28 景 ALOS 数据监测了胜利油田 2007 年~2011 年的地表形变情况,发现胜利油田出现形变漏斗,最大形变速率为 19 mm/yr。

本文采用短基线集(Small Baseline Subsets, SBAS)技术方法对覆盖东营市的 84 景 Sentinel-1B 单视复数影像进行了处理,获得了东营市 2016 年 9 月至 2019 年 9 月的地表形变场与形变时间序列,并针对沉降特征分析了其形成的主要机理。

2. SBAS-InSAR 原理

短基线集(Small Baseline Subsets, SBAS) [8]技术是对相干目标(Coherent Target, CT)进行相位分析来获取时序形变,通过选择合适的空间基线和时间基线阈值组成差分干涉对,并且选取相干目标点利用线性相位变化模型进行建模和解算,并通过时空滤波去除大气延迟,在减少 DInSAR 处理中的失相关影响及高程、大气误差的同时获取地表的形变时间序列。

首先设置时空基线的阈值,对干涉图进行时间维滤波,并基于相干目标进行相位建模和参数解算,

然后根据各自的特征采用空间滤波方法进行分离,进一步获取变形阶段、大气阶段、噪声阶段等的信息,最终获得研究区域长时序的变形信息,SBAS-InSAR 技术流程如下图 1 所示。

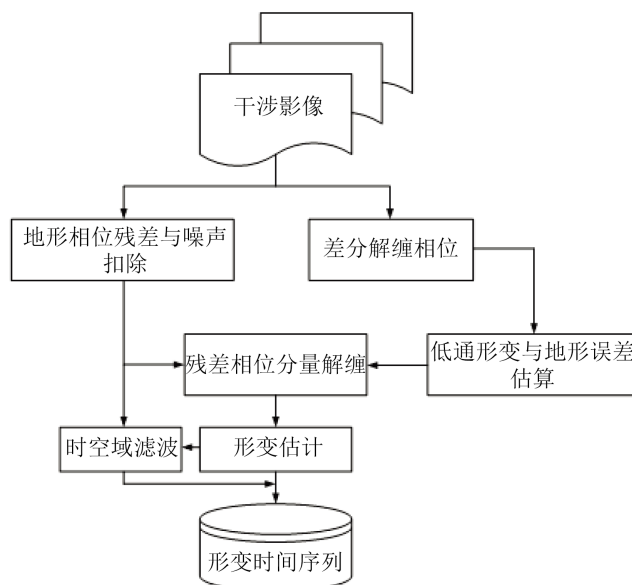


Figure 1. Processing Flowchart of the SBAS-INSAR
图 1. SBAS-InSAR 技术处理流程图

假设 SAR 卫星在该地区分别于 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ 时间点获取 N 景 SAR 影像, 生成了 M 个干涉对组合, 并且 M 满足式(1-1)所示关系:

$$(N+1)/2 \leq M \leq (N^2 + N)/2 \quad (1-1)$$

任意时间段内获取的干涉相位 $\Delta\varphi_i$ 包括: $\Delta\varphi_{def,i}$ 形变相位、 $\Delta\varphi_{ref,i}$ 参考椭球面相位、 $\Delta\varphi_{atm,i}$ 大气延迟相位、 $\Delta\varphi_{top,i}$ 地形相位、 $\Delta\varphi_{noi,i}$ 噪声相位。见公式(1-2)

$$\Delta\varphi_i = \Delta\varphi_{def,i} + \Delta\varphi_{ref,i} + \Delta\varphi_{atm,i} + \Delta\varphi_{top,i} + \Delta\varphi_{noi,i} \quad (1-2)$$

式中, i 为第 i 幅影像; $\varphi_i(t_{h1})$ 、 $\varphi_i(t_{h2})$ 为不同时刻获取的相位。

$$\varphi = (A^T A)^{-1} A^T \delta\varphi \quad (1-3)$$

在对形变信息进行解算时将其表示为矩阵, 采用奇异值分解方法, 根据公式(1-3)最小二乘求解, 在得到累积形变量后, 将相位转换为沉降速率, 从而得出时间序列的沉降量。

2.1. 研究区概况与数据源

东营市位于山东省北部黄河三角洲地区, 黄河在东营市境内流入渤海。东营市地势低平, 坡降低, 自然比约为 1/8000~1/12,000, 地理位置为 $36^{\circ}55'N \sim 38^{\circ}10'N$, 东经 $118^{\circ}07'E \sim 119^{\circ}10'E$ 。东、北临渤海, 西与滨州市毗邻, 南与淄博市、潍坊市接壤。南北最大纵距 123 公里, 东西最大横距 74 公里, 土地总面积 8243 平方公里。

东营市地处中纬度, 背陆面海, 受亚欧大陆和西太平洋共同影响, 属暖温带大陆性季风气候, 基本气候特征为冬寒夏热, 四季分明。年平均降水量 555.9 mm, 多集中在夏季, 占全年降水量的 65%, 降水量年际变化大, 易形成旱、涝灾害。东营地区处于黄河下游, 地下径流缓慢, 土壤含盐量高, 咸水分布

广泛,沿海浅层卤水储量 2 亿多立方米,深层盐矿、卤水资源主要分布在东营凹陷地带,推算储量达 1000 多亿吨。浅层淡水主要分布在广饶南部及利津 - 陈庄沿黄河一带,黄河故道多处分布上层滞水;深层淡水分布于东营 - 利津以南地区。研究区概略图见下图 2 (蓝色方框为研究区)。



Figure 2. Location of Study Area
图 2. 研究区地理位置

2.2. 数据源介绍

本文采用 2016 年 9 月至 2019 年 9 月的 84 景 C 波段 Sentinel-1B 降轨数据对研究区域进行沉降监测, Sentinel-1B 数据的空间分辨率为 Range: 2.330 m, Azimuth: 13.951 m。本文选定 2018 年 5 月 9 日的影像作为主影像, 设定的时空基线阈值分别为 48 d 和 186 m, 干涉像对时空连接如图 3 所示。另外本实验中采用的 DEM 为日本宇宙航空研究开发机构地球观测研究中心发布的 AWS30 产品, 其空间分辨率为 30 m, 高程精度为 5 m。

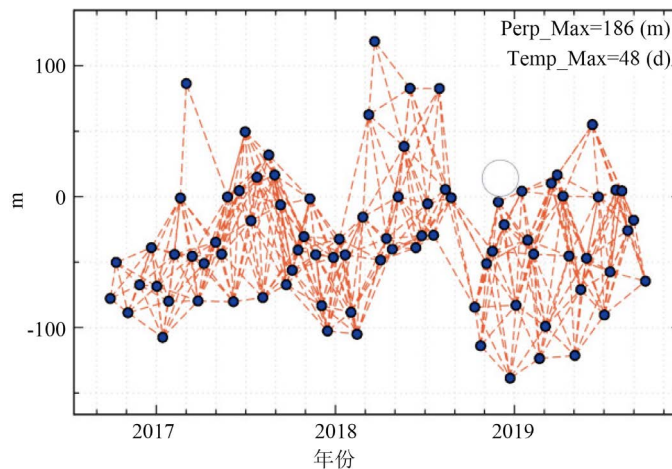


Figure 3. Intergograms pair connection diagram
图 3. 干涉像对连接图

3. 试验与分析

3.1. 沉降监测结果

本文采用 SBAS-InSAR 技术对覆盖东营市的 84 景 Sentinel-1B 单视复数影像进行了处理, 获得了该地区 2016 年 9 月至 2019 年 9 月的沉降速率以及累积沉降量等沉降特征。图 4 为最终获得的东营市地表沉降速率图, 由图 4 可知, 东营市在近海沿岸地区存在两个显著的沉降中心(见图 4 黑色虚线框 I 和 II), 最大沉降量均超过了 50 cm。另在 I、II 两个沉降漏斗中分别选择一个沉降中心点 A 和 B (见图 4)。图 5 为 A、B 两点在 2016 年 9 月至 2019 年 9 月的累积沉降时间序列。

将图 4 叠加到谷歌地球上, 可以看到沉降漏斗 I 位于东营市垦利区永安镇的广源盐场, 北至永馆路, 南至红光大道, 东至河海路, 西至省道 S228, 该区在 2016 年至 2019 年三年内的年平均沉降速率为 9.3 cm/yr。其中, A 点的累积沉降量为 51 cm, 年平均沉降速度是 17 cm/yr。

沉降漏斗 II 位于东营市广饶县盐场(东营市广饶县盐化工业集团总公司), 北至支脉河, 南至小清河, 东至滩沟子, 西至东八路。该区在 2016 年至 2019 年内的年平均沉降速率为 10.5 cm/yr。其中, B 点的累积沉降量为 56 cm, 年平均沉降速度达到了 19 cm/yr。该沉降数据与程霞[9] 2020 年获取的该地区的沉降数据基本一致。另外从图 5 中可以看到, A、B 两点的沉降时间序列近似于线性排列, 沉降速度大致相同且较稳定。

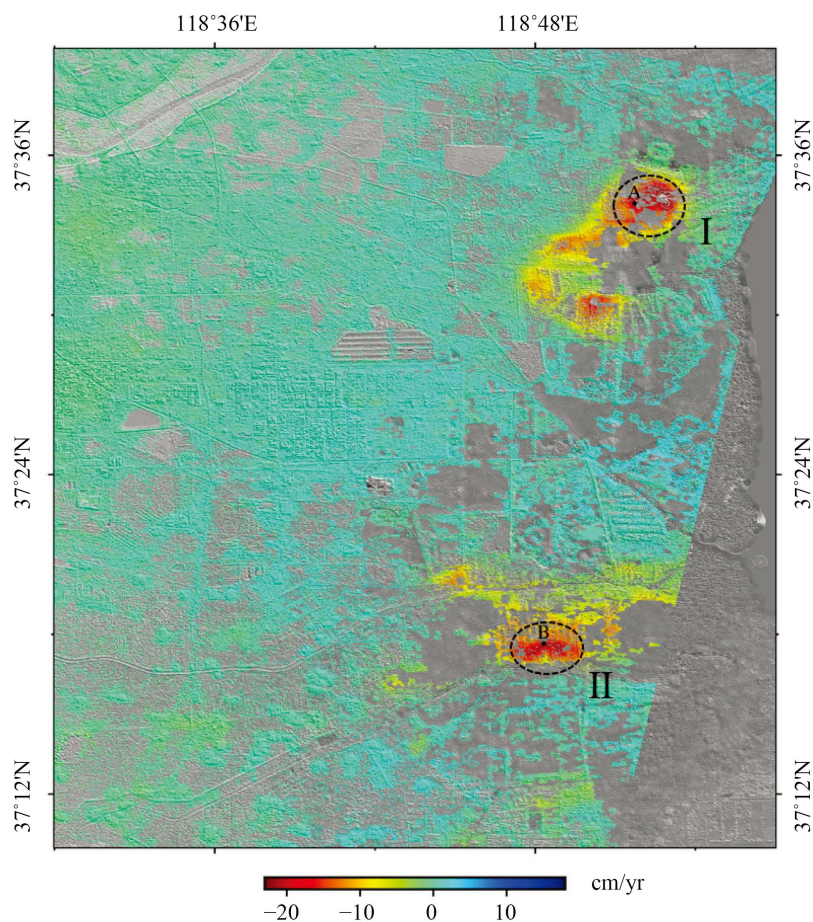


Figure 4. Subsidence rate diagram

图 4. 沉降速率图

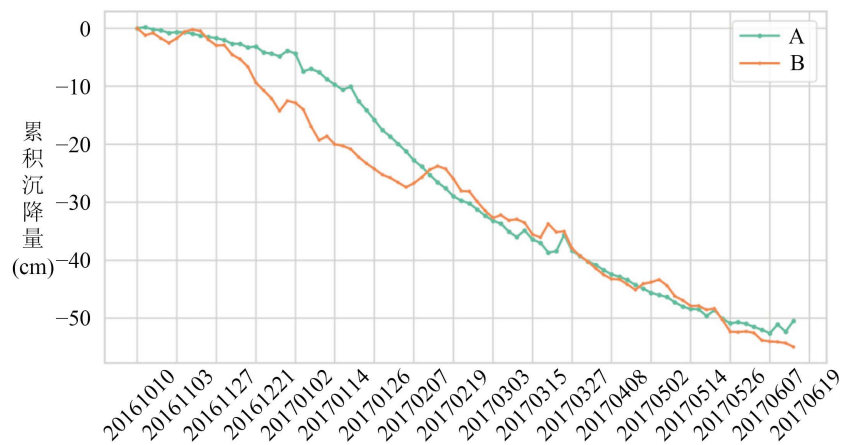


Figure 5. Cumulative subsidence diagram
图 5. 累积沉降量图

3.2. 沉降原因分析

东营市水资源短缺且分布不均, 黄河水受季节性影像, 大多数排入海洋, 能被人们利用的只有很小一部分, 利用率低; 大部分地区浅层地下水矿化度较高, 埋藏深的深层地下水水量有限且碱性大, 含氟量高, 不适宜农田灌溉, 但是东营蕴藏着丰富的天然卤水矿床, 滨海地区浅层卤水储量达 74 亿立方米, 位于东营区境内地下盐矿储量 5900 亿吨, 地表可建设 600 万吨的盐场, 因此这里聚集了众多以烧碱、氯气、溴、镁、钾深加工产品为核心的盐化工产业。全市三县两区均有制盐企业, 重点制盐企业有东营市广饶县盐化工业集团总公司、东营春兴盐化有限公司等共 13 家。

I、II 两个沉降漏斗都位于盐田场, 说明地下卤水资源的开采是地面沉降的主要原因。由于地下水比海水盐度高, 因此常被化工厂用来制取溴化合物和盐, 而尾水会通过排水渠被输入到盐田晒盐。仅以 2015 年为例, 东营市盐田面积为 77.75 万亩, 原盐生产能力达到了 469 万吨/年, 生产溴素 9939 吨。随着制盐企业生产规模的不断扩大, 地下卤水被过度开采, 这会显著降低卤水的盐度, 并降低地下水位, 破坏地层结构, 从而导致严重的地表沉降。

4. 结论

本文采用 SBAS-InSAR 技术利用 84 景 Sentinel-1B 单视复数影像对东营市进行地表沉降监测, 获取了该地区 2016 年 9 月至 2019 年 9 月的沉降速率图, 发现了近海沿岸地区存在两个沉降漏斗(I 和 II), 且两地区平均沉降速率分别为 9.3 cm/yr 和 10.5 cm/yr。经过分析得出结论: 地下卤水的过度抽取是该地区发生地面沉降的主要原因。

东营濒临渤海, 且海拔极低, 发生地面沉降容易导致海水倒灌、城市排水不畅等问题, 对人民的生命和财产安全构成极大威胁。因此, 只有对该地进行实时的地面沉降监测, 加强地下水动态监测, 根据可采资源量合理地开采地下水, 才能预防和控制地面沉降, 本文研究对于该地工程建设和城市发展具有指导意义。

参考文献

- [1] 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(2): 1-8.
- [2] 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.
- [3] 刘国祥. InSAR 基本原理[J]. 四川测绘, 2004, 27(4): 187-190.

-
- [4] 刘国祥, 陈强, 丁晓利. 基于雷达干涉永久散射体网络探测地表形变的算法与实验结果[J]. 测绘学报, 2008, 37(2): 13-18.
- [5] 张金芝. 基于 InSAR 时序分析技术的现代黄河三角洲地面沉降监测及典型影响因子分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2015.
- [6] 刘鹏, 周志伟, 汪驰升. 基于时序 InSAR 的东营地区地表沉降研究[J]. 测绘工程, 2016, 25(9): 1-5+11.
- [7] 李乃一, 伍吉仓. 基于时序 InSAR 技术监测胜利油田地表沉降[J]. 工程勘察, 2018(5): 50-54
- [8] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., *et al.* (2002) A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- [9] 程霞, 张永红, 邓敏, 吴宏安, 康永辉. Sentinel-1A 卫星的黄河三角洲近期地表形变分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(2): 43-51.