

Monitoring the Large Gradient Land Subsidence Caused by Oil Exploitation Based on StaMPS

Chong Yang¹, Bing Yu^{2*}, Yonglian Sha¹, Shirao Li¹, Yunliang Hu², Xianhong He²

¹Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Email: swjtu_yc@163.com, *rs_insar_bingyu@163.com

Received: Mar. 12th, 2019; accepted: Mar. 27th, 2019; published: Apr. 3rd, 2019

Abstract

The large gradient and large-scale land subsidence caused by oil exploitation will not only destroy the production facilities of oil wells, but also affect the surrounding environment and people's lives. In this paper, the subsidence of some oil production plants in Panjin of Liaohe Plain is monitored by StaMPS technology, using 21 L-band ALOS/PALSAR data from 2007 to 2010 and 22 C-band Sentinel-1B data from 2016 to 2018. The results show that: 1) There are two distinct subsidence funnels in the whole research area from 2007 to 2010, which correspond to Shuguang Oil Production Plant and Huanxiling Oil Production Plant respectively. The subsidence area of Shuguang Oil Production Plant is about 28 km², and the maximum subsidence rate is -243.0 mm/year. The subsidence area of Huanxiling Oil Production Plant is about 19 km², and the maximum subsidence rate is -76.9 mm/year. The subsidence funnel of Shuguang Oil Production Plant directly affects the safety of some section of S308 Expressway in Liaoning Province. 2) From 2016 to 2018, the maximum subsidence rate of Shuguang Oil Production Plant is -162.6 mm/year, and the maximum subsidence rate of Huanxiling Oil Production Plant is -85.0 mm/year. The S308 Expressway in Liaoning Province is still in the subsidence funnel of Shuguang Oil Production Plant. 3) This paper proves that for areas with large gradient subsidence and more vegetation coverage, StaMPS technology has stable and reliable subsidence monitoring ability. In addition, compared with C-band SAR data, L-band SAR data has stronger anti-jamming and detection ability.

Keywords

Oil Exploitation, Land Subsidence, Large Gradient, StaMPS Technology

利用StaMPS技术监测石油开采导致的大梯度地面沉降

*通讯作者。

文章引用: 杨崇, 于冰, 沙永莲, 李诗婉, 胡云亮, 何贤宏. 利用 StaMPS 技术监测石油开采导致的大梯度地面沉降[J]. 测绘科学技术, 2019, 7(2): 74-82. DOI: 10.12677/gst.2019.72012

杨崇¹, 于冰^{2*}, 沙永莲¹, 李诗娆¹, 胡云亮², 何贤宏²

¹西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都

²西南石油大学土木工程与建筑学院, 四川 成都

Email: swjtu_yc@163.com, *rs_insar_bingyu@163.com

收稿日期: 2019年3月12日; 录用日期: 2019年3月27日; 发布日期: 2019年4月3日

摘要

石油开采引起的大梯度、大范围地面沉降, 不仅会破坏油井的生产设施, 同时会影响周边环境和人们的生活。本文采用StaMPS技术, 利用2007~2010年的21景L波段ALOS/PALSAR数据和2016~2018年的22景C波段Sentinel-1B数据, 对辽河盘锦地区的部分采油厂进行沉降监测。结果表明: 1) 2007~2010年, 整个研究区域存在两个显著的沉降漏斗, 分别对应曙光采油厂和欢喜岭采油厂。曙光采油厂的沉降面积约为28 km², 最大沉降速率达到了-243.0 mm/年; 欢喜岭采油厂的沉降面积约为19 km², 最大沉降速率约为-76.9 mm/年。曙光采油厂的沉降漏斗直接影响到了辽宁省内高速公路S308部分路段的安全。2) 2016~2018年, 曙光采油厂的最大沉降速率为-162.6 mm/年; 欢喜岭采油厂的最大沉降速率约为-85.0 mm/年。辽宁省内高速公路S308依然处于曙光采油厂的沉降漏斗内。3) 证明了对于大梯度沉降和植被覆盖较多的区域, StaMPS技术具有稳定、可靠的沉降监测能力; 相对于C波段的SAR数据, L波段的SAR数据抗干扰性更强、探测能力也更强。

关键词

石油开采, 地面沉降, 大梯度, StaMPS技术

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

石油开采引起的地面沉降是缓慢积累的, 在石油开采的过程中往往不易发现, 但是随着时间的增加, 开采量的增大, 石油开采将会引起大梯度的地面沉降, 这不仅会破坏油井的生产设施, 给石油开采造成巨大的损失, 同时将会影响油井及周边构筑物的安全, 威胁人们的生活、生命财产安全[1] [2] [3]。为了减少地面沉降给油井及人们生活造成的危害, 对油田开采区域进行实时的地面沉降监测十分必要。

传统的地面沉降监测技术, 如水准测量、GPS 测量, 具有很高的测量精度, 在测量行业中具有不可替代的作用, 但是对大范围的地面沉降进行监测, 需要耗费大量的人力、物力、财力。目前, 合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)以其全天时、全天候、高分辨率、高精度、高效率、监测范围广等优势, 已经被广泛应用于地面沉降监测工作中[4]。常规的 D-InSAR 技术易受时空失相干、大气延迟、噪声等因素的影响[5] [6], 不能对地面沉降进行有效监测, 而时序 InSAR 技术克服了常规 D-InSAR 技术的这些缺点, 通过选取在时间上长期保持稳定的永久性散射体(Permanent Scatter, PS)作为监测点, 提取可靠的形变结果[5]。在大范围地面沉降监测工作中, 时序 InSAR 技术具有无可比拟的优势。

辽河油田是我国的第三大油田，年平均原油产量达到千万吨以上[7]。长期超负荷的石油开采，导致储油层压力下降，油气区和黏土层压实，进而引起地表沉降。辽河盘锦地区的部分采油厂存在大梯度大范围的地面沉降现象[8]。因此，本文采用 21 景 L 波段的 ALOS/PALSAR 数据和 22 景 C 波段的 Sentinel-1B 数据，通过时序 InSAR 技术中的 StaMPS 技术对辽河盘锦地区的部分采油厂进行地面沉降监测，获取了 2007 年 1 月至 2010 年 9 月和 2016 年 12 月至 2018 年 12 月两个时段的地面沉降监测结果，并对该监测结果进行对比分析，以期石油开采引起的大梯度大范围地面沉降提供一种有效的监测方法，同时为相关机构提供辽河盘锦地区两个时段的地面沉降状况，为其及时做出安全防范措施提供参考。

2. 研究区域概况和数据

该研究区域位于辽宁省盘锦市的正西部，地处辽河平原的最南端，覆盖了盘锦市和锦州市的部分区域，区域范围为东经 121.49°~122.05°，北纬 40.93°~41.32°，如图 1 所示。整个研究区域内地势平坦、开阔，双台子河从中穿过，另有京哈高速公路、辽宁省内高速公路 S308 和 S102 横亘其中，最重要的是该研究区域包括了辽河油田最大的采油厂——曙光采油厂[9]，和横跨盘锦、锦州两市的欢喜岭采油厂。

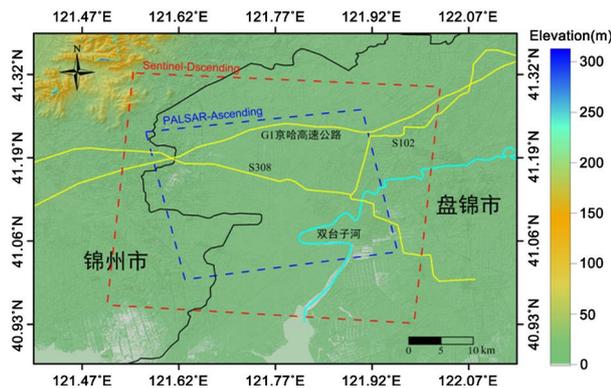


Figure 1. Study area
图 1. 研究区域范围

本文采用 2007 年 1 月至 2010 年 9 月的 21 景 L 波段 PALSAR 升轨数据和 2016 年 12 月至 2018 年 12 月的 22 景 C 波段 Sentinel-1B 降轨数据对研究区域进行沉降监测，数据具体参数如表 1 所示，包括数据的获取时间、入射角度、轨道模式、垂直基线四个参数。PALSAR 数据的空间分辨率为 range: 4.680 m, azimuth: 3.147 m; Sentinel-1B 数据的空间分辨率为 range: 2.330 m, azimuth: 13.951 m。PALSAR 数据的覆盖范围如图 1 蓝色虚线框所示，覆盖面积约为 722.63 km²，Sentinel-1B 数据的覆盖范围如图 1 红色虚线框所示，覆盖面积约为 1688.77 km²。

Table 1. Parameter of PALSAR and Sentinel-1B
表 1. PALSAR 和 Sentinel-1B 数据参数表

序号	PALSAR 数据参数				Sentinel-1B 数据参数			
	时间	入射角(度)	升/降	垂直基线(m)	时间	入射角(度)	升/降	垂直基线(m)
1	20070131	38.731	升	842.0103	20161211	33.949	降	-30.1768
2	20070618	38.731	升	1735.4543	20170422	33.949	降	-65.3026
3	20070803	38.731	升	2292.3843	20170528	33.949	降	-179.4560
4	20070918	38.731	升	2168.4398	20170621	33.949	降	-113.2071
5	20071103	38.731	升	2757.9250	20170715	33.949	降	-126.8935

Continued

6	20071219	38.731	升	2757.7868	20170808	33.949	降	-55.7120
7	20080203	38.731	升	3483.0234	20170901	33.949	降	-118.0942
8	20080320	38.731	升	3602.0740	20171007	33.949	降	-63.0613
9	20080505	38.731	升	4181.0303	20171112	33.949	降	-105.7818
10	20080620	38.731	升	1616.7901	20171218	33.949	降	0.0000
11	20081221	38.731	升	-645.7517	20180123	33.949	降	-135.6968
12	20090205	38.731	升	0.0000	20180228	33.949	降	-47.4770
13	20090508	38.731	升	600.2612	20180324	33.949	降	-235.2671
14	20090808	38.731	升	600.9683	20180417	33.949	降	-153.7997
15	20090923	38.731	升	1217.2601	20180523	33.949	降	-105.9400
16	20091224	38.731	升	1849.0472	20180616	33.949	降	-140.3758
17	20100208	38.731	升	2419.3582	20180722	33.949	降	-104.0658
18	20100326	38.731	升	2869.2765	20180827	33.949	降	-153.2138
19	20100511	38.731	升	2855.5024	20180920	33.949	降	-110.9361
20	20100626	38.731	升	2893.1894	20181014	33.949	降	-72.5348
21	20100926	38.731	升	3800.3139	20181107	33.949	降	-58.0203
22					20181201	33.949	降	-89.5900

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 AWSD30 产品，其空间分辨率为 30 m，高程精度为 5 m。AWSD30 是目前可以免费获取的覆盖范围最广、精度最高的数字高程模型之一[10]。

3. InSAR 数据处理

目前时序 InSAR 衍生技术有多种，其中 StaMPS 技术不对形变进行模型约束，能够提取较大梯度的形变，且该技术是基于干涉相位稳定性和空间相关性选取 PS 点，对植被覆盖度较高的区域，同样能够选出一定数量的 PS 点[11] [12]。考虑到本研究区域内的田地分布较多且有大梯度沉降存在，本文采用 StaMPS 技术来进行沉降监测。

假设有 $N + 1$ 景影像，选取整体相干性最优的影像作为公共主影像，后将其他影像配准到该主影像的格网空间。将所有配准好的从影像分别与主影像组成干涉对，共组成 N 个干涉对，对所有的干涉对进行差分干涉处理，得到 N 个差分干涉图。在第 x 个差分干涉图中，第 i 个象元的差分干涉相位可表示为：

$$\Delta\varphi_i^x = \Delta\varphi_{def-i}^x + \Delta\varphi_{dem-i}^x + \Delta\varphi_{atm-i}^x + \Delta\varphi_{orb-i}^x + \Delta\varphi_{noise-i}^x \quad (1)$$

式(1)中， $\Delta\varphi_i^x$ 指的是第 x 个差分干涉图中第 i 个象元的差分干涉相位， $\Delta\varphi_{def-i}^x$ 表示形变相位， $\Delta\varphi_{dem-i}^x$ 表示高程误差相位， $\Delta\varphi_{atm-i}^x$ 表示大气延迟相位， $\Delta\varphi_{orb-i}^x$ 表示轨道误差相位， $\Delta\varphi_{noise-i}^x$ 表示噪声相位。

通过振幅离差指数阈值方法提取 PS 候选点，后对这些 PS 候选点进行噪声计算，去除那些仅在个别干涉图中相位稳定或受到邻近 PS 点影响而表现出 PS 点特征的象元，剩余的即为 PS 点。

估计并剔除 PS 点相位的空间不相关误差，并更新 PS 点相位；对更新后的 PS 点相位进行时空三维解缠；分析各干扰误差相位在时间和空间上的特征差异，对解缠相位进行时、空滤波，分离并剔除各误差相位，最后提取形变相位。

由于 StaMPS 解算的结果为视线向(Line of Sight, LOS)的形变结果，而 PALSAR 数据和 Sentinel-1B

数据的采集方式和入射角度不同, 为了使其能够相互参考, 需要将 LOS 向形变转换到垂直向。LOS 向形变和垂直向形变的转换可以通过式(2)实现。其中 Δd_{los} 指的是 LOS 向形变, θ 指的是卫星采集数据的入射角, Δd_v 即为垂直向的形变。

$$\Delta d_v = \frac{\Delta d_{los}}{\cos \theta} \quad (2)$$

4. 监测结果及分析

对于 21 景 PALSAR 影像, 选取 2009 年 2 月 5 日获取的影像作为公共主影像, 使其他的 20 景影像与其配准, 并做差分干涉处理; 对于 22 景 Sentinel-1B 影像, 选取 2017 年 12 月 18 日获取的影像作为公共主影像, 使其他的 21 景影像与其配准, 并做差分干涉处理。两组数据的空间基线如表 1 所示。

基于斯坦福大学开发的 StaMPS 软件[13], 对 L 波段的 PALSAR 数据进行处理得到 2007 年 1 月至 2010 年 9 月的沉降速率场, 如图 2 所示。整个研究区域, 总共选取了 105174 个 PS 点, 监测密度为 145 点/km², 除了少部分植被覆盖区域因失相干而没有监测点外, 大部分区域都均匀分布有监测点。整个研究区域内分布有两个显著的沉降漏斗, 分别位于后大垮和西龙王庙附近, 其他区域无明显沉降。其中后大垮附近的沉降现象非常严重, 沉降范围较大, 沉降面积约为 28 km², 最大沉降速率达到了 -243.0 mm/年; 西龙王庙附近的沉降现象相对缓和, 沉降范围相对较小, 沉降面积约为 19 km², 最大沉降速率约为 -76.9 mm/年。资料调查显示, 两个显著沉降漏斗主要是由于石油、天然气开采所致, 分别对应曙光采油厂和欢喜岭采油厂, 两个采油厂从 20 世纪 80 年代已经开始运营, 目前已经有 40 多年的开采历史[14] [15]。省内高速公路 S308 从曙光采油厂的沉降漏斗区域穿过, 严重的地面沉降给公路的安全运营造成了巨大的安全隐患。

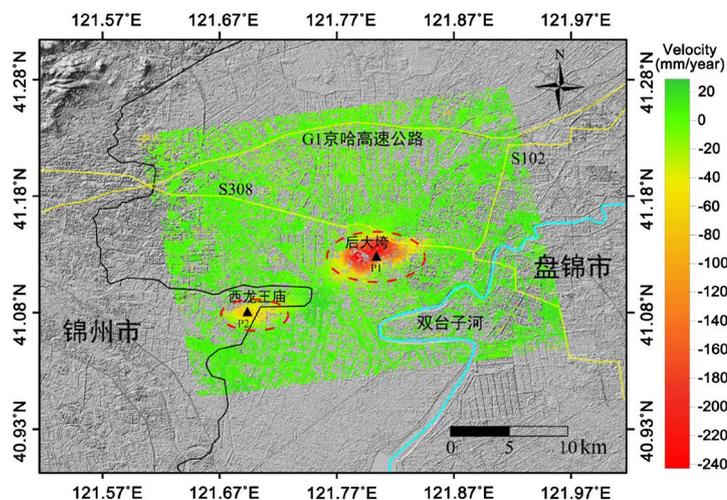


Figure 2. Subsidence rate map from January 2007 to September 2010

图 2. 2007 年 1 月~2010 年 9 月沉降速率图

为了更好的揭示因石油、天然气开采引起的地面沉降过程, 将 2007 年 1 月至 2010 年 9 月的沉降时间序列结果刻画出来, 如图 3 所示, 其中每个时间刻度的沉降结果均是相对于主影像日期(2009 年 2 月 5 日)。从图 3 可看出, 主影像时刻(2009 年 2 月 5 日)的沉降量为 0; 2007 年 1 月 31 日至 2008 年 12 月 21 日的相对沉降结果均为正值, 说明 2007 年 1 月 31 日至 2008 年 12 月 21 日一直在发生沉降; 2009 年 5 月 8 日至 2010 年 9 月 26 日的沉降结果均为负值, 同样说明 2009 年 5 月 8 日至 2010 年 9 月 26 日一直在

发生沉降。从整个时段的沉降结果来看,发现整个沉降过程是循序渐进的,随着时间的增加,沉降的程度不断增加,沉降的范围不断增大。结果表明,石油、天然气开采引起的地面沉降过程是缓慢累积的,虽然短时间内不易发生较大的形变,但是随着时间累积,却可能形成大梯度大范围的沉降后果。

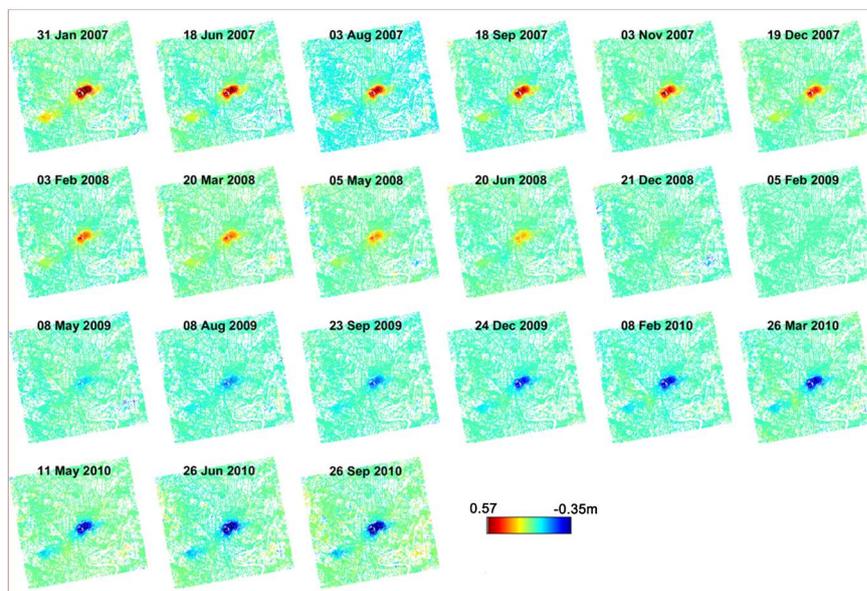


Figure 3. Map of time series subsidence from January 2007 to September 2010
图 3. 2007 年 1 月~2010 年 9 月沉降时间序列图

基于 StaMPS 软件,对 C 波段的 Sentinel-1B 数据进行处理得到 2016 年 12 月至 2018 年 12 月的沉降速率结果,如图 4 所示。整个研究区域,选取了 82819 个 PS 点,监测密度为 49 点/km²,监测密度较小,失相干现象较为严重,大部分植被覆盖区域没有监测点,沉降漏斗周围也没有提取到足够的监测点。整个研究区域内仍然存在两个显著的沉降漏斗,仍然对应曙光采油厂和欢喜岭采油厂。曙光采油厂的沉降现象依然很严重,最大沉降速率为-162.6 mm/年;欢喜岭采油厂的沉降现象相对缓和,最大沉降速率约为-85.0 mm/年。近两年曙光采油厂的沉降速度有所减缓,经过调查资料可知,曙光采油厂目前已经进入后期开发阶段,新油井投产减少,老油井复产不佳,剩余储量和剩余可开采量大大减少[15][16]。省内高速公路 S308 依然位于曙光采油厂的沉降漏斗范围内,地面沉降对此公路一直潜藏着安全隐患。

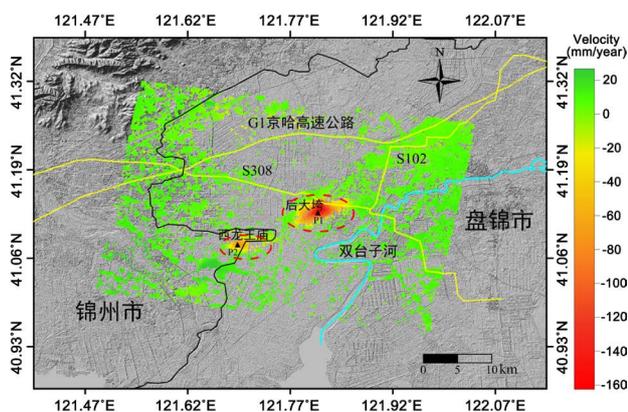


Figure 4. Subsidence rate map from December 2016 to December 2018
图 4. 2016 年 12 月~2018 年 12 月沉降速率图

对 2016 年 12 月至 2018 年 12 月的沉降监测结果进一步分析,发现尽管在植被覆盖度较高和沉降梯度较大的区域提取不到有效的监测点,监测密度较小,但从整个研究区域的监测结果来看,在有效的监测点位上,除了两个固有的沉降漏斗以外,其他区域无明显沉降,说明监测结果是可靠的,证明了 StaMPS 技术对于植被覆盖度较高且存在大梯度沉降区域的沉降监测能力是可靠的和稳定的。

对 2007 年 1 月至 2010 年 9 月的沉降结果进一步分析,发现尽管监测周期更长,沉降梯度更大,但是整个研究区域的监测密度较大且监测点位分布均匀,失相干区域较小,较好的提取了整个研究区域的沉降结果。由此可以证明,无论是在植被覆盖较多区域,还是大梯度沉降区域,L 波段的 PALSAR 数据都有着比 C 波段的 Sentinel-1B 数据更稳定、更可靠的沉降监测能力。

为了更具体的掌握两个时段两个沉降漏斗的沉降过程,本文分别在曙光采油厂和欢喜岭采油厂的沉降漏斗区选取了特征点 P1 和 P2,并从两个时段的监测结果中对应提取了这两个特征点的沉降时间序列,并将其刻画出来,如图 5 所示。值得说明的是,实际操作中是在每个特征点附近随机选取三个点,因此每个特征点均有三个点与其对应。

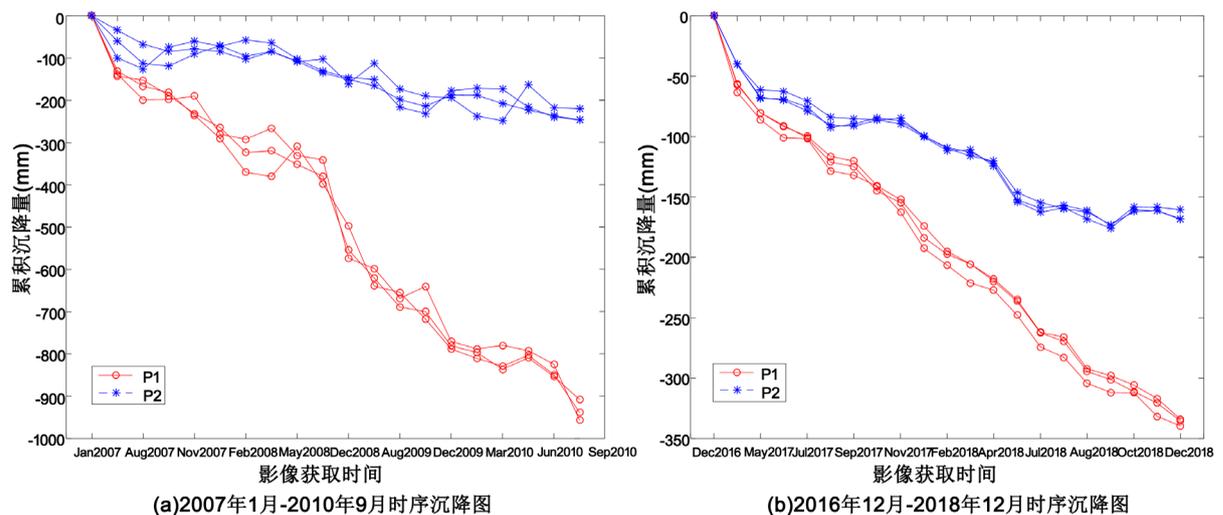


Figure 5. Comparison of time series subsidence
图 5. 时序沉降对比图

从图 5 可以看出,2007 年 1 月至 2010 年 10 月,曙光采油厂地面沉降梯度非常大,在近四年的时间里,最大累积沉降量达到了约 950 mm,而欢喜岭采油厂地面沉降梯度相对较小,最大累积沉降量达到了约 240 mm;在 2016 年 12 月至 2018 年 12 月,曙光采油厂的地面沉降梯度有所减小,在两年的时间里,最大累积沉降量达到了约 340 mm,欢喜岭采油厂的地面沉降梯度依然相对较小,最大累积沉降量达到了约 170 mm。对比两个时段的沉降结果,发现两个沉降漏斗的沉降梯度依然较大,沉降现象依然很严重。因此,相关部门应该对于这两个大型沉降漏斗予以高度重视和关注,及时的采取改善措施,以防严重的地面沉降给采油厂及周围的居民造成不可估量的损失。

5. 结论

本文分别选取 21 景 L 波段的 ALOS/PALSAR 数据和 22 景 C 波段的 Sentinel-1B 数据,通过 StaMPS 技术对辽河盘锦地区的部分采油厂进行沉降监测,获取了两个时段的地面沉降监测结果,并进行对比分析。得出结论如下:

1) 2007年1月至2010年9月,整个研究区域存在两个沉降漏斗,这两个沉降漏斗主要是由于石油、天然气开采所致,分别对应曙光采油厂和欢喜岭采油厂,其他区域无明显沉降。曙光采油厂的沉降现象较为严重,沉降范围较大,沉降面积约为28 km²,最大沉降速率达到了-243.0 mm/年,最大累积沉降量达到了约950 mm;欢喜岭采油厂的沉降现象相对缓和,沉降范围相对较小,沉降面积约为19 km²,最大沉降速率约为-76.9 mm/年,最大累积沉降量达到了约240 mm。其中,曙光采油厂的沉降范围较大,已经影响到了省内高速公路S308的安全运营。

2) 2016年12月至2018年12月,曙光采油厂的沉降现象依然严重,最大沉降速率为-162.6 mm/年,最大累积沉降量达到了约340 mm;欢喜岭采油厂的沉降现象相对缓和,最大沉降速率约为-85.0 mm/年,最大累积沉降量达到了约170 mm;其他区域无明显沉降。省内高速公路S308依然位于曙光采油厂的沉降漏斗内,依然受到大梯度地面沉降的威胁。

3) 对比两组数据的沉降监测结果,发现对于大梯度沉降和植被覆盖度较高区域,StaMPS技术具有稳定、可靠的沉降监测能力;相对于C波段的Sentinel-1B数据,L波段的PALSAR数据抗干扰性更强、探测能力也更强。

本文的研究结果可为相关机构提供曙光和欢喜岭两个采油厂的地面沉降状况,为其及时做出安全防范措施提供参考。同时,本文的研究内容为石油开采引起的大梯度沉降区域提供了一种稳定、可靠的地面沉降监测方法。

基金项目

国家自然科学基金青年科学基金项目(41801399),测绘遥感信息工程国家重点实验室资助课题(18E01),油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学)资助项目(PLN201815),国家重点研发计划(2017YFB0502700),国家自然科学基金面上项目(41771402),国家自然科学基金青年基金(编号41601503),四川省科技支撑计划应用基础上项目(2018JY0564、2018JY0138)。

致 谢

感谢日本遥感数据中心提供的ALOS PALSAR数据,感谢欧空局提供的Sentinel-1B数据,感谢日本宇宙航空研究开发机构地球观测研究中心提供的30 m分辨率DSM,感谢斯坦福大学提供的StaMPS软件支持。

参考文献

- [1] 姜岩,田茂义.石油与天然气开采引起的地表下沉预测[J].辽宁工程技术大学学报,2003(6):746-748.
- [2] 田红,邓金根,周建良,等.石油开采引起的油藏压实与地面沉降预测[J].岩土力学,2005,26(6):929-931.
- [3] 张文昭.美国威明顿油田地面下沉与防治[J].国外油气勘探,1999,9(4):56-60.
- [4] 李德仁.InSAR技术进步与地面沉降监测应用[J].上海国土资源,2013,34(4):1-6.
- [5] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2000) Non-Linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**, 2202-2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- [6] Zebker, H.A., Rosen, P.A. and Hensley, S. (1997) Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>
- [7] 许德禹.储层和裂缝预测技术及在辽河油田开发的应用[D]:[硕士学位论文].大庆:东北石油大学,2014.
- [8] Sun, H., Zhang, Q., Zhao, C.Y., et al. (2017) Monitoring Land Subsidence in the Southern Part of the Lower Liaohe Plain, China with a Multi-Track PS-InSAR Technique. *Remote Sensing of Environment*, **188**, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.037>

- [9] 鞠飞. 辽河油田曙光采油厂高程引测的必要性[J]. 地下水, 2014, 36(4): 201-202.
- [10] JAXA (2018) ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D-30m (AW3D30)”.
<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>
- [11] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., *et al.* (2004) A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters*, **31**, L23611.
- [12] Hooper, A. (2006) Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation. PhD Thesis, Stanford University, San Francisco.
- [13] Hooper, A., Bekaert, D. and Spaans, K. (2013) StaMPS/MTI Manual.
<http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/>
- [14] 暴富昌. 辽河油田欢喜岭采油厂: 科学调整产量结构[J]. 中国石油石化, 1999(5): 54-55.
- [15] 梅东风. 曙光油田油井增产措施优选与效果评价[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [16] 郑水平. 辽河油田曙光采油厂原油生产打赢“上半场” [EB/OL].
<http://news.cnpc.com.cn/system/2015/07/13/001550303.shtml>, 2015-07-13.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-549X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: gst@hanspub.org