

金坛盐穴天然气储库区地表变形 PSI 监测

李郎平¹, 兰恒星¹, 李 晓², 孟云闪¹, 陈 雨²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘要: 地面沉降监测对天然气地下储气库安全有效运行具有重要意义。由于盐穴空间分布和应力环境周期性改变的特点, 盐穴储库区地面变形具有空间差异性和时间波动性。因而, 利用监测时空密度较高的技术才能全面细致地反映盐穴储库区地面变形的时空特征。基于永久散射体雷达干涉测量(PSI)技术, 利用 PALSAR 数据, 对金坛盐穴天然气储库区在 2007~2010 年的地面变形进行监测。与地面 GPS 监测结果的对比表明, PSI 监测在变形的总体趋势和非线性过程方面都具有较高精度, 并且监测的空间范围更广、空间密度和时间密度更高。储库区地面变形显示明显的空间差异, 沉降高值区与人类工程活动强烈的区域对应。同时, 监测时间段内的储库区非线性变形过程可以被划分为 3 个沉降阶段和 2 个抬升阶段。但是因为相关资料的缺乏, 这种沉降和抬升的交替现象是否与各时段的人类活动特征有关, 还有待进一步研究。

关键词: 岩石力学; 金坛天然气储库区; 地表变形; 永久散射体雷达干涉测量; PALSAR 数据

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)09 - 1821 - 09

MONITORING OF GROUND DEFORMATION IN JINTAN SALT CAVERN GAS STORAGE AREA USING PERMANENT SCATTERER INTERFEROMETRY(PSI)

LI Langping¹, LAN Hengxing¹, LI Xiao², MENG Yunshan¹, CHEN Yu²

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Monitoring the ground deformation concerns the safety of gas storages much. The ground deformation in salt cavern gas storage area is characterized by spatial diversity and temporal nonlinearity owing to the spatial distribution of salt caverns and the cyclic variation of stress environment. A technique with high spatial and temporal monitoring density is therefore needed to fully reveal the spatial and temporal characteristics of the ground deformation in salt cavern gas storage area. Based on permanent scattered interferometry(PSI) technique, the ground deformation history in Jintan salt cavern gas storage area from 2007 to 2010 was retrieved using PALSAR data. Compared with GPS data, the PSI results are found to have higher accuracy in both reflecting the general trend and the nonlinear process of ground deformation, and to have higher monitoring density in both spatial and temporal domains. The ground deformation in Jintan gas storage area presents obvious spatial patterns. Area with high settlement velocity corresponds to the area with intense human engineering activities. In addition, nonlinear behaviors were found in the ground deformation history in Jintan gas storage area; and this deformation

收稿日期: 2012 - 05 - 07; **修回日期:** 2012 - 05 - 27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724605); 国家自然科学基金资助项目(41072241)

作者简介: 李郎平(1985 -), 男, 2010 年毕业于南京大学自然地理学专业, 现为博士研究生, 主要从事地质灾害方面的研究工作。E-mail: liip@reis.ac.cn

history could be divided into three stages of settlement and two stages of uplifts. However, owing to insufficiency of relevant data, the problem that whether this fluctuation between settlement and uplift is attributed to human activities requires further research.

Key words: rock mechanics; Jintan gas storage area; ground deformation; permanent scatterer interferometry(PSI); PALSAR data

1 引言

盐岩长期蠕变引起盐穴收缩,不但造成盐穴储气能力降低,同时也可能引起盐穴的破坏甚至垮塌,威胁储气库的使用安全^[1]。另一方面,储气库运行时的周期性注采气作业过程频繁改变盐穴应力环境,进而也可能造成盐穴变形和破坏^[2]。由于直接对腔体变形进行测量的成本较高,而储库区地表变形在一定程度上可由地下盐穴变形引起,因此,进行储库区地面变形的监测,分析其与地下腔体变形的关系,对地下储气库安全有效运行有重要意义。

金坛盐穴储气库位于上海和南京之间(见图 1),用于天然气的季节调峰,是我国“西气东输”的重要配套工程,对保障长江三角洲地区的用气安全至关重要。由于地下盐穴的空间分布及盐穴应力环境的周期性波动,盐穴及储库区地表的变形也具有空间上的差异和时间上的波动性。有关部门 2007 年在老腔注气区域布设了地面沉降监测网,到 2010 年底其进行了 5 次地面沉降水准和 GPS 监测。但是,水准和 GPS 监测在监测的空间密度和时间密度上都受到一定限制,不能很好地反映储库区地表变形的

空间差异和非线性过程。因此,为了能够更全面、细致地反映储库区地面变形的时空特征,需要采用监测效率更高、监测空间范围更广、监测空间和时间密度更高的技术。相较于水准和 GPS 测量,新近的永久散射体雷达干涉测量(permanent scatterer interferometry, PSI)技术^[3]在地面变形监测的效率、规模和时空密度上都具备一定优势。因此,本文利用 PSI 技术开展了金坛盐穴天然气储库区地表变形监测的试验研究,并初步分析和讨论了地表变形的空间差异和非线性过程。

2 研究方法

2.1 PSI 技术

地表变形监测的常用方法,如水准测量和 GPS 测量等,采取地面作业方式,在监测精度上有较大保障。但是,地面作业方式在监测范围和规模上受到较大限制,且工作量大。差分雷达干涉测量(DInSAR)技术通过分析不同时间目标反射信号的相位变化来推算目标变形,具有快速反演大面积地面变形场的能力^[4]。但是,由于去相干效应,即由于时间间隔和空间基线过大等原因,目标 2 次反射

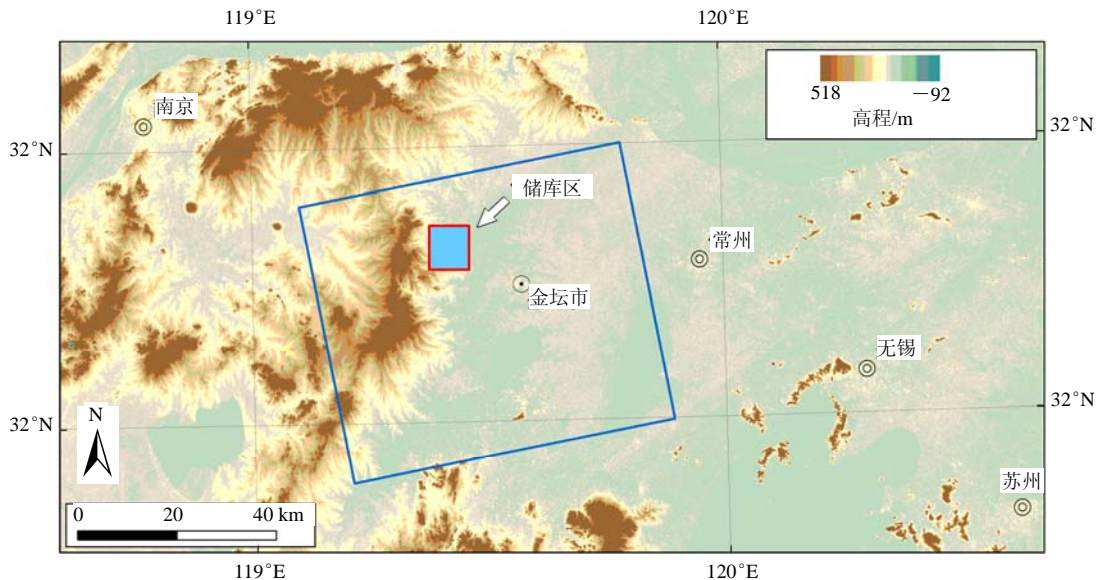


图 1 PALSAR 影像覆盖范围
Fig.1 Coverage of PALSAR image

信号不能进行相互干涉进而获得变形信息, DInSAR 只有在监测快速大变形(如同震变形)时才具有较大的精度。PSI 技术利用同一区域长时间序列的合成孔径雷达(SAR)影像(一般大于 20 景)识别那些在时间上具有稳定散射特性的永久散射(permanent scatterer, PS)点进行干涉, 在很大程度上克服了传统 DInSAR 技术由于基线去相干、时间去相干以及大气延迟效应带来的应用限制^[5]。

自基于 PSI 的思想首先以 PSInSAR 技术提出以来^[5], 许多学者相继提出了若干其他的 PSI 技术, 如: 小基线集方法(small baseline subset approach, SBAS)^[6]、相干像素技术(coherent pixels technique, CPT)^[7]、干涉点目标分析(interferometric point target analysis, IPTA)^[8]、斯坦福永久散射体法(Stanford method for persistent scatterers, StaMPS)^[9]、时空解缠网(spatio-temporal unwrapping network, STUN)算法^[10]、稳定点网络(stable point network, SPN)^[11]和干涉目标检测(coherent target monitoring, CTM)^[12]等。

PSI 技术具备毫米级变形监测的能力^[13], 是目前地表变形监测的理想手段, 已广泛应用于欧美^[14-16]和国内^[17-22]的地面沉降监测中。在 Las Vegas 的 PSI 试验研究中, 利用 ERS 和 TerraSAR-X 雷达影像数据集的 PSI 分析分别达到了 450 和 30 375 个/km² 的 PS 点密度^[23], 远远超过传统地面监测手段的监测密度。PSI 技术除可得到地表变形历史外, 还可实现对数字高程模型(DEM)的校正, 并附带获得大气对延迟影响的精确数据。

2.2 干涉点目标分析(IPTA)技术

作为一种重要的 PSI 技术, IPTA 技术^[8]同样基于永久散射体思想。IPTA 技术与其他 PSI 技术的最大区别在于, IPTA 技术是对相位模型进行回归分析来获得变形历史、高程校正值和大气效应值等, 而不是直接对相位模型方程组进行求解。目前 IPTA 技术已在意大利的威尼斯^[24-26]和罗马^[27]、希腊的 Rio-Antirio^[28]以及我国广州^[29]、天津^[22]等地区的地面沉降研究中得到成功应用。

本文采用 IPTA 技术对雷达数据集进行永久散射体雷达干涉的处理。IPTA 数据处理的关键步骤包括:

(1) PS 点提取

配准 SAR 影像集, 根据回波信号强度或谱相位

的稳定性确定 PS 点候选目标列表。

(2) 差分干涉相位堆栈生成

选取参考影像, 生成点干涉堆栈。对于每个干涉像对, 根据初始基线模拟生成平地相位和地形相位, 并从干涉相位中减去得到差分干涉相位 Φ_{dif} 。

(3) 回归分析和线性变形提取

在 IPTA 的相位模型中, 差分干涉相位 Φ_{dif} 被分解为地形误差相位 Φ_{topoerr} 、变形相位 Φ_{def} 、大气效应相位 Φ_{atm} 和噪音相位 Φ_{noise} 等, 即

$$\Phi_{\text{dif}} = \Phi_{\text{topoerr}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

相位模型表明, 地形相位与垂直基线线性相关。假设一个线性变形速率, 变形相位则与时间线性相关。据此, 分别将差分干涉相位对垂直基线和时间进行线性回归, 回归曲线斜率则代表了高程误差值和线性变形速率。回归分析的残余相位包括大气效应相位、非线性变形相位、基线误差和噪音等有关相位。

(4) 残余相位分解和非线性变形提取

残余相位中不同成分具有不同的空间和时间相关性。大气相位在空间域上是低通的, 在时间域上不相关; 非线性变形在空间域和时间域都是低通的; 基线误差在空间域上是低通的, 在像对之间不相关; 而相位噪声在时间域和空间域均是随机的。因此, 可以利用空间滤波和时间滤波对残余相位的成分进行分离, 最终提取出非线性变形。

2.3 数据来源

研究区 SAR 数据选择需要同时兼顾数据的空间分辨率、空间覆盖范围以及数据的时间分辨率和时间跨度。考虑到金坛盐穴储气库从 2007 年开始在老腔区进行了注采气作业以及地面沉降的监测, 研究选取了 2007~2010 年的 2 种较高分辨率 SAR 数据: 地面分辨率约为 15 m×3 m 的 ALOS PALSAR 数据和地面分辨率约为 20 m×4 m 的 ESA ERS-2 数据。本文主要为 ALOS PALSAR 数据集的初步分析结果。研究区在 2007 年后共有 22 景 ALOS PALSAR 影像存档(见表 1), 其空间覆盖范围见图 1。

3 结果与讨论

3.1 数据处理初步结果

表 1 PALSAR 影像集
Table 1 PALSAR datasets

序号	影像编号	垂直基线长/m	间隔时间/d	备注
1	20070129	-487	-966	-
2	20070616	351	-828	-
3	20070801	926	-782	-
4	20070916	860	-736	-
5	20071217	1416	-644	-
6	20080201	1926	-598	-
7	20080318	1926	-552	-
8	20080503	2531	-506	-
9	20080803	-11 988	-414	未使用
10	20081103	-1451	-322	-
11	20081219	-1399	-276	-
12	20090203	-866	-230	-
13	20090321	-495	-184	-
14	20090621	-157	-92	-
15	20090806	-576	-46	-
16	20090921	0	0	参考影像
17	20091222	566	92	-
18	20100206	1 062	138	-
19	20100624	1 362	276	未使用
20	20100924	2 131	368	-
21	20101109	1 495	414	-
22	20101225	2 262	460	-

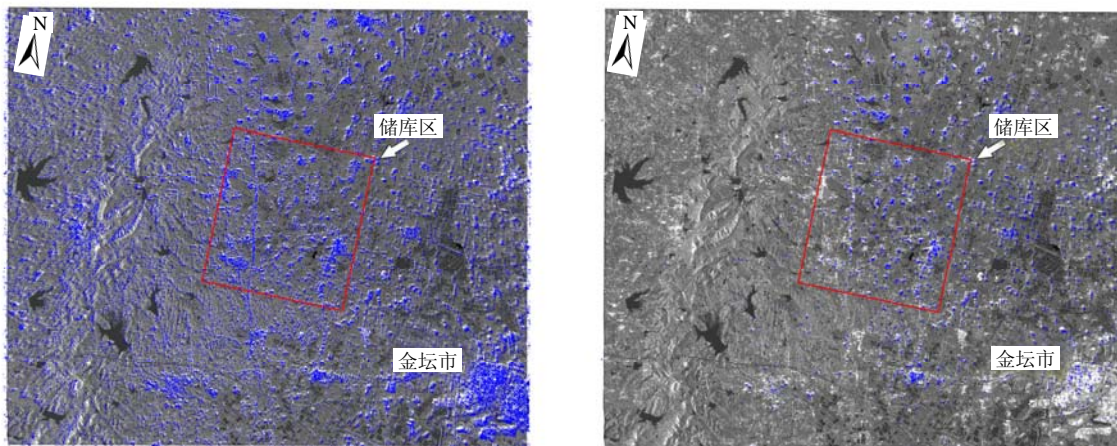
注：间隔时间以参考影像为基准，之前为“-”，之后为“+”。

在 PSI 分析之前，首先对 PALSAR 影像进行质量控制。20080803 影像轨道与其余影像轨道偏移较

大，造成空间基线较大，而 20100624 影像轨道数据误差较大，造成基线误差较大，因此，这 2 幅影像被排除出 PSI 分析队列(见表 1)。仅对余下的 20 景影像进行分析，并以储库区为中心将分析范围缩小至 30 km×24 km 左右。PS 点的选取利用幅度统计和相位谱统计 2 种方法，初始候选 PS 点共 146 333 个(见图 2)，密度约为 200 个/km²。PS 点质量由回归分析的标准偏差进行控制，回归标准偏差大于一定阈值的 PS 点被舍弃。由于 20 景影像较少(少于 25 景)，故分析采用了多参考影像策略，也即两两干涉形成干涉相位堆栈，并增加 20090921 影像的自相干，总共生成 191 个点干涉图。

根据地面 GPS 监测资料，储库区 GPS 监测所得最大沉降速率约为-3.2 mm/a，最大抬升速率约为 0.9 mm/a。因此，在进行差分干涉相位回归分析时，线性变形速率的范围被控制在-5.0~1.0 mm/a 范围内，并根据 PS 点的线性变形速率对 PS 点的质量进行控制。变形速率超出这一范围的 PS 点被认为是低质量点而被排出。本研究的主要目的在于从整体上分析实验区地面变形的时空特征及其原因，因而少数具有真实大变形的 PS 点也不是本研究的主要分析目标。

通过回归分析的标准偏差，结合线性变形速率，对 PS 点进行质量控制，最终的高质量 PS 点有 3 495 个(见图 2)。分析区平均监测密度约为 5 个/km²，储库区监测密度约为 10 个/km²。初步结果显示，储库区平均地面变形速率为-1.5 mm/a。老腔区地面 GPS 监测平均沉降速率为-0.8 mm/a，与之对应的



(a) 初始候选 PS 点

(b) 最终高质量 PS 点

图 2 初始候选 PS 点及最终高质量 PS 点

Fig.2 PS point candidates and accepted PS points of high-quality

PSI 监测平均变形速率约为-1.8 mm/a。从平均地面变形速率来看，地面 GPS 监测结果与 PSI 监测结果误差不超过 1 mm/a。

3.2 储库区地面变形的空间差异

引起地面变形空间差异的因素有很多，大体上可分为自然因素和人为因素。自然因素如地质条件在空间上的差异，人为因素主要指人类工程活动的空间差异。PSI 监测结果显示，储库区主要存在 2 个快速沉降区(见图 3)：快速沉降区 I 的平均变形速率约为-2.3 mm/a，快速沉降区 II 的平均变形速率约为-2.5 mm/a，均高于储库区平均地面沉降速率。可以看出，长条形快速沉降区 I 与储库区西部的扬溧高速十分吻合，椭圆形快速沉降区 II 与荣炳—陈家庄盐矿区有关联，说明人类工程活动对地面沉降有加速作用。相比较于快速沉降区 I 与扬溧高速的关联程度，快速沉降区 II 与荣炳—陈家庄矿区的空间关联存在一定偏差，这主要表现在快速沉降区 II 的南部未包含在荣炳—陈家庄矿区内部。另外，茅兴盐矿区并未呈现出明显的快速沉降现象，可能是由两大矿区地质条件的差异引起的。储气库地质综

合评价也表明，茅兴矿区较荣炳—陈家庄矿区的顶板抗压强度大，是建设地下储气库的最佳地区。

其他快速沉降现象，例如快速沉降区 I 以东的局部快速沉降以及快速沉降区 II 南部的快速沉降，可能是由自然地质条件(如靠近河流)或人类活动(如围池养殖)等引起的。老腔区地面 GPS 监测结果(见图 4)显示，老腔区东北部凡石桥附近的沉降速率要大于西南部汀湘村和奉仙庵附件的沉降速率。PSI 监测结果同样显示老腔区东北较西南沉降速率大，与地面 GPS 的监测结果相吻合。由于老腔区已经开始注采气作业，因此老腔区地面沉降空间差异除受到局部地质条件的影响外，还有可能是由不同的注采气作业过程引起的。

3.3 储库区地面变形的非线性过程

PSI 监测相较于地面水准监测或 GPS 监测的一大优势体现在 PSI 监测时间点更加密集，因而可以更细致地呈现地面变形的非线性历史。图 5 给出了 5 个典型地面 GPS 监测点及其邻近 PS 点的非线性变形过程的对比。可以看出，典型 PS 点反演的变形总体趋势与非线性过程都和实测数据吻合较好，

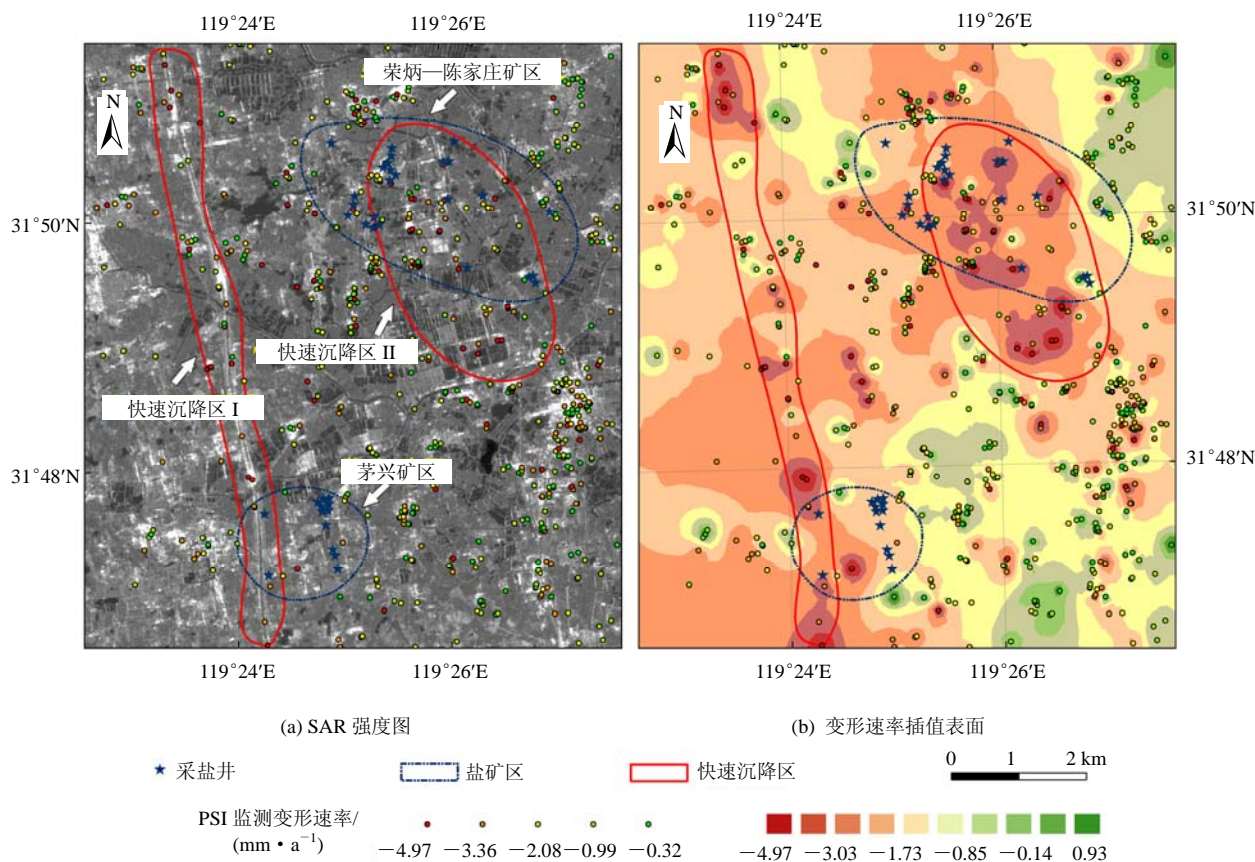
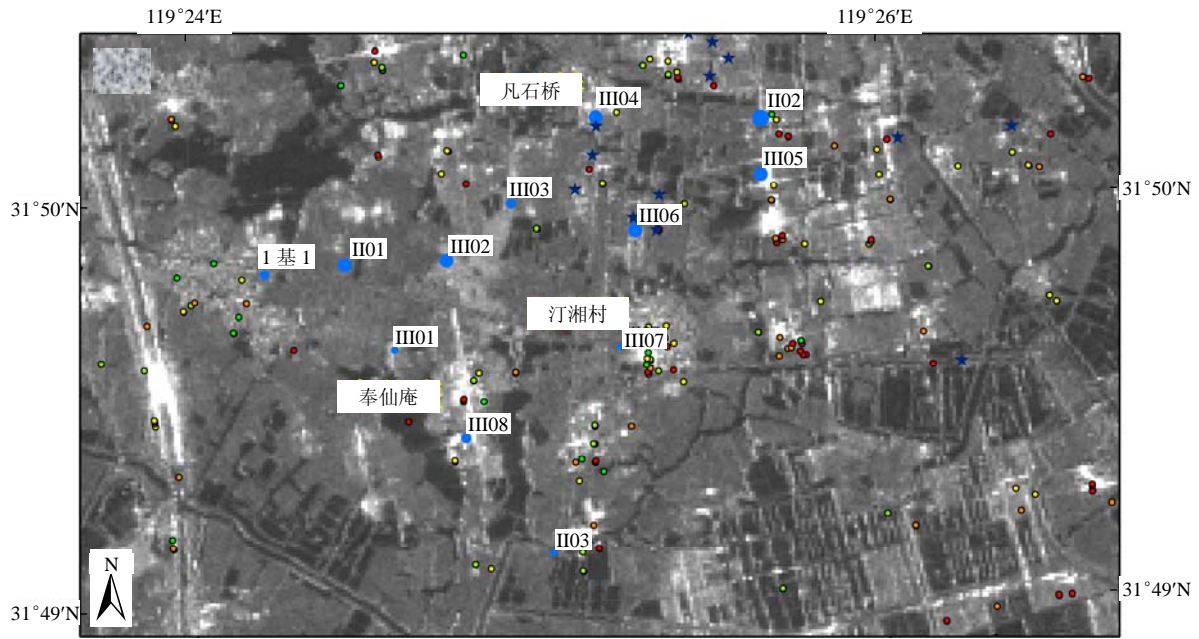
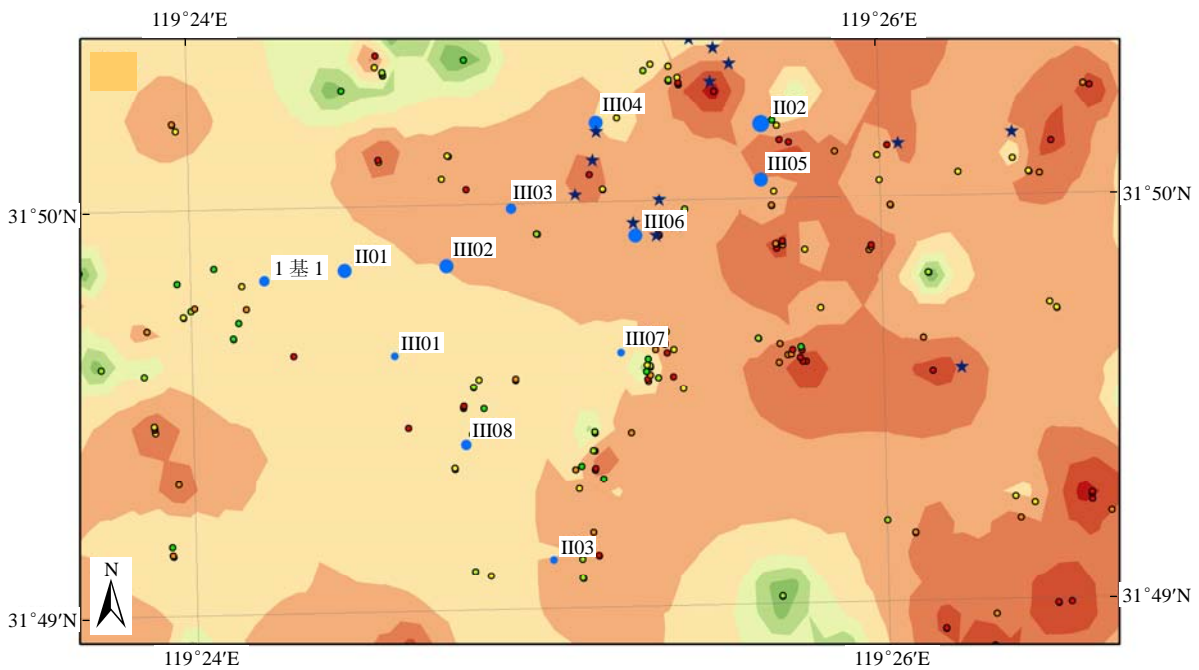


图 3 以 SAR 强度图及以变形速率插值表面为背景的储库区 PS 点变形速率

Fig.3 Deformation rates of PS points in Jintan salt cavern gas storage area taking SAR intensity map and interpolation map of deformation rate as background, respectively



(a) SAR 强度图



(b) 变形速率插值表面

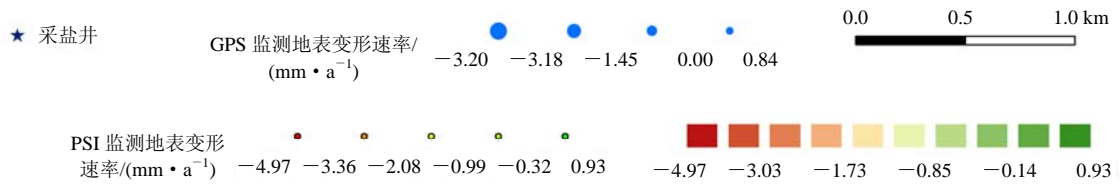


图 4 以 SAR 强度图及以变形速率插值表面为背景的老腔区地表沉降速率

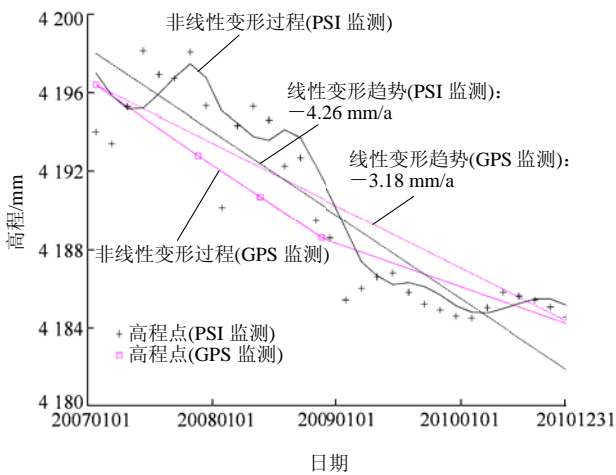
Fig.4 Surface deformation rate around the old cavities of Jintan salt cavern gas storage area taking SAR intensity map and interpolation map of deformation rate as background, respectively

说明 PSI 监测在时间域上是可靠的，并且 PSI 监测手段较地面 GPS 监测反映的变形过程更丰富。

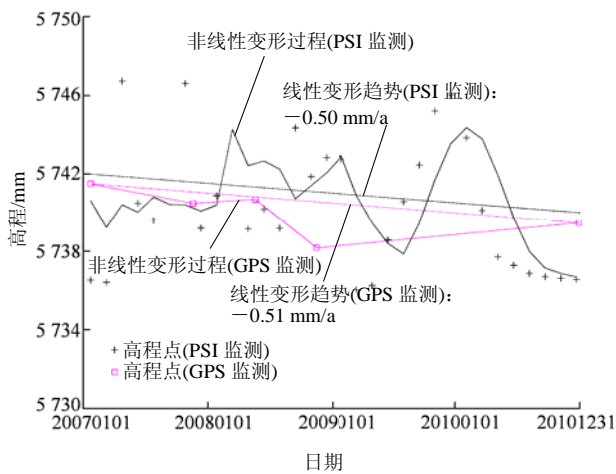
总结以上分析结果可以发现，储库区地面非线性变形有如下主要特征：

(1) 储库区北部，如 GPS 监测点 II02(见图 4, 5(a)), 相较储库区南部，沉降速率较大，且非线性变形特征不明显。

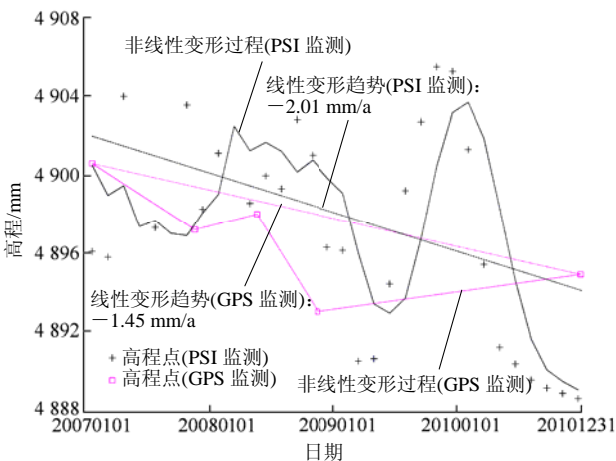
(2) 在监测时间段内(2007~2010 年)，前半阶段储库区地面变形波段性较大，后半阶段储库区地面变形的非线性波动相对较小，但是波动幅度相对较大。



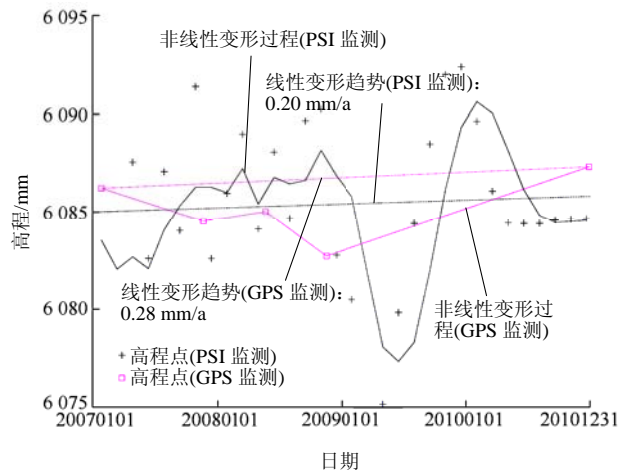
(a) GPS 监测点 II02 及 PSI 监测点 92297



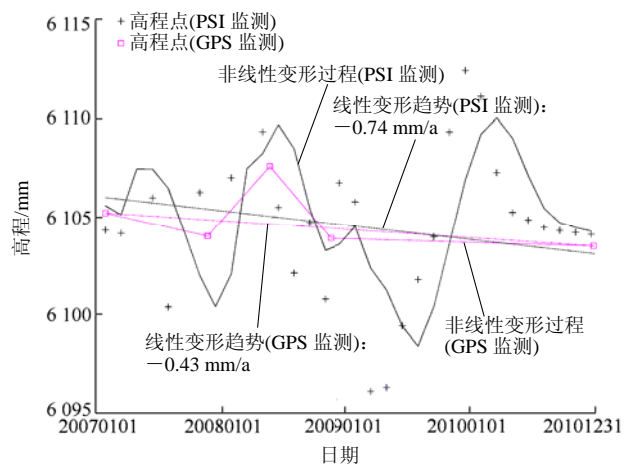
(b) GPS 监测点 III03 及 PSI 监测点 91298



(c) GPS 监测点 III06 及 PSI 监测点 90737



(d) GPS 监测点 III07 及 PSI 监测点 87549



(e) GPS 监测点 III08 及 PSI 监测点 86657

图 5 储库区地表变形非线性过程

Fig.5 Nonlinear processes of surface deformation in Jintan salt cavern gas storage area

(3) GPS 监测记录了 2 个沉降时间段和 2 个抬升时间段，PSI 监测记录了 3 个沉降时间段和 2 个抬升时间段。GPS 监测记录的第 2 个抬升时间段(2008 年 11 月 15 日~2010 年 12 月 25 日)在 PSI 监测记录中反映为 1 个抬升阶段和 1 个沉降阶段，进一步说明 PSI 监测的时间分辨率较地面 GPS 监测高。

(4) 老腔区地面变形的非线性特征，特别是交替性的沉降和抬升现象，可能与人类活动，比如地下水开采或注采气周期性作业过程等有关。但是，由于相关资料缺乏，目前尚不能确定地分析其原因。

4 结 论

本文针对盐穴储库区地面变形具有的空间差异性和时间波动性，利用 PALSAR 数据，开展了金坛

盐穴天然气储库区地面变形的 PSI 监测, 并利用地面 GPS 实际监测资料对 PSI 监测结果进行了验证。初步结果表明:

(1) PSI 监测在地面变形总体趋势和非线性过程的反映方面都具有较高精度, 并且与地面 GPS 监测相比较, 具有在监测空间密度和时间密度上的双重优势。

(2) 储库区地面变形显示了明显的空间分异, 快速沉降区与人类工程活动(如高速公路修建、盐矿开采和盐穴储气井注采气作业等)相关。

(3) 储库区地面变形具有复杂的非线性特征, 在监测时间段(2007~2010年)内, 可划分为3个沉降阶段和2个抬升阶段。但是, 由于缺少相关资料, 这种沉降与抬升交替的现象是否与人类活动直接有关有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 王同涛, 闫相祯, 杨秀娟, 等. 考虑盐岩蠕变的盐穴储气库地表动态沉降量预测[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(5): 687 - 692. (WANG Tongtao, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan, et al. Dynamic subsidence prediction of ground surface above salt cavern gas storage considering the creep of rock salt[J]. Scientia Sinica Technologica, 2011, 41(5): 687 - 692.(in Chinese))
- [2] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩中能源(石油和天然气)地下储存库稳定性评价标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2497 - 2505.(WU Wen, HOU Zhengmeng, YANG Chunhe. Investigations on evaluating criteria of stabilities for energy(petroleum and natural gas) storage caverns in rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2497 - 2505.(in Chinese))
- [3] RAUCOULES D, BOURGINE B, DE MICHELE M, et al. Validation and intercomparison of persistent scatterers interferometry: PSIC4 project results[J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 68(3): 335 - 347.
- [4] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, 364(6433): 138 - 142.
- [5] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8 - 20.
- [6] BERADINO 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.
- [7] MORA O, MALLORQUI J J, BROQUETAS A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10): 2243 - 2253.
- [8] WERNER C, WEGMULLER U, STROZZI T, et al. Interferometric point target analysis for deformation mapping[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'03). [S.l.]: [s.n.], 2003: 4362 - 4364.
- [9] HOOPER A, ZEBKER H, SEGALL P, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(23), doi: 10.1029/2004GL021737.
- [10] KAMPES B M. Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry[Ph. D. Thesis][D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2005.
- [11] DURO J, INGLADA J, CLOSA J, et al. High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data[EB/OL]. [2012 - 05 - 07]. http://www.isprs.org/proceedings/2005/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/T04.pdf.
- [12] VAN DER KOOIJ M, HUGHES W, SATO S, et al. Coherent target monitoring at high spatial density: examples of validation results[C]// Proceedings of the FRINGE 2005 Workshop: Advances in SAR Interferometry from ERS and Envisat Missions. Frascati, Italy: European Space Agency, 2005.
- [13] PRATI C, FERRETTI A, PERISSIN D. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations[J]. Journal of Geodynamics, 2010, 49(3/4): 161 - 170.
- [14] MEISINA C, ZUCCA F, FOSSATI D, et al. Ground deformation monitoring by using the permanent scatterers technique: the example of the Oltrepo Pavese(Lombardia, Italy)[J]. Engineering Geology, 2006, 88(3/4): 240 - 259.
- [15] COLESANTI C, FERRETTI A, NOVALI F, et al. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7): 1685 - 1701.
- [16] BELL J W, AMELUNG F, FERRETTI A, et al. Permanent scatterer INSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge[J]. Water Resources Research, 2008, 44(W02407), doi: 10.1029/2007WR006152.
- [17] LI D R, LIAO M S, WANG Y, et al. Validation of the result from permanent scatterer InSAR in Shanghai[C]// LACOSTE H ed. Proceedings of the 2005 Dragon Symposium(SP - 611). Santorini, Greece: [s.n.], 2005: 43.1.

- [18] 汤益先, 张红, 王超. 基于永久散射体雷达干涉测量的苏州地区沉降研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(8): 1 015 - 1 020. (TANG Yixian, ZHANG Hong, WANG Chao. Research on land subsidence of Suzhou area using PS-InSAR technology[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 1 015 - 1 020.(in Chinese))
- [19] 陈强, 刘国祥, 李永树, 等. 干涉雷达永久散射体自动探测——算法与实验结果[J]. 测绘学报, 2006, 35(2): 112 - 117.(CHEN Qiang, LIU Guoxiang, LI Yongshu, et al. Automated detection of permanent scatterers in radar interferometry: algorithm and testing results[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2): 112 - 117.(in Chinese))
- [20] 范景辉, 李梅, 郭小方, 等. 基于 PSInSAR 方法和 ASAR 数据监测天津地面沉降的试验研究[J]. 国土资源遥感, 2007, (4): 23 - 27.(FAN Jinghui, LI Mei, GUO Xiaofang, et al. A preliminary study of the subsidence in Tianjin area using ASAR images based on PSInSAR technique[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, (4): 23 - 27.(in Chinese))
- [21] 宫辉力, 张有全, 李小娟, 等. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的北京市地面沉降研究[J]. 自然科学进展, 2009, 19(11): 1 261 - 1 266.(GONG Huili, ZHANG Youquan, LI Xiaojuan, et al. Research on the ground subsidence of Beijing based on PS-InSAR technology[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(11): 1 261 - 1 266.(in Chinese))
- [22] LAN H X, LI L P, LIU H J, et al. Complex urban infrastructure deformation monitoring using high resolution TerraSAR-X PSI[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(2): 643 - 651.
- [23] ADAM N, EINEDER M, YAGUE-MARTINEZ N, et al. High resolution interferometric stacking with TerraSAR-X[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Boston, USA: [s.n.], 2008: II - 117 - II - 120.
- [24] TEATINI P, TOSI L, STROZZI T, et al. Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 403 - 413.
- [25] TEATINI P, STROZZI T, TOSI L, et al. Assessing short- and long-time displacements in the Venice coastland by synthetic aperture radar interferometric point target analysis[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(F01012), doi: 10.1029/2006JF000656.
- [26] TOSI L, TEATINI P, CARBOGNIN L, et al. Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: the Venice Coast, Italy[J]. Tectonophysics, 2009, 474(1/2): 271 - 284.
- [27] STRAMONDO S, BOZZANO F, MARRA F, et al. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6): 3 160 - 3 172.
- [28] PARCHARIDIS I, FOUMELIS M, KOURKOULI P, et al. Persistent scatterers InSAR to detect ground deformation over Rio-Antirio area(western Greece) for the period 1992 - 2000[J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 68(3): 348 - 355.
- [29] ZHAO Q, LIN H, JIANG L M, et al. A study of ground deformation in the Guangzhou urban area with persistent scatterer interferometry[J]. Sensors, 2009, 9(1): 503 - 518.