

罗三明,单新建,朱文武等. 2014. 多轨 PSInSAR 监测华北平原地表垂直形变场. 地球物理学报, 57(10):3129-3139, doi:10.6038/cjg20141004.

Luo S M, Shan X J, Zhu W W, et al. 2014. Monitoring vertical ground deformation in the North China Plain using the multitrack PSInSAR technique. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(10):3129-3139, doi:10.6038/cjg20141004.

多轨 PSInSAR 监测华北平原地表垂直形变场

罗三明¹,单新建²,朱文武¹,杜凯夫¹,万文妮¹,梁洪宝¹,刘志广¹

1 中国地震局第一监测中心,天津 300180

2 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京 100029

摘要 针对 PSInSAR 技术监测大空间尺度地表垂直形变场的不足,提出通过基准转换与数据拼接、融合不同轨道多个独立片区(Frame)获取大空间尺度地表垂直形变场方法.由于不同轨道主影像选取的参考基准不一致、不同轨道垂直基线不同、不同片区相位解缠的参考 PS 不同等因素影响,使得 PSInSAR 获得的不同轨道地表垂直形变场的空间基准存在差异,提取的地表形变信息不具有可比性.利用两个相邻片区重叠区域的 PS 点集,根据迭代最近点算法提取两片区公共区域内同名点,并兼顾同名点距离的权,精确计算两片区的配准参数,实现两片区的“无缝”连接,最后使各独立片区拼接成一个连续的大空间尺度地表垂直形变场.本文推导了多轨 PSInSAR 技术获得的不同片区形变场基准转换与数据拼接的数学模型,并以华北平原(115.32°E—118.79°E, 36.81°N—40.58°N)为实验区,解析了 3 个不同轨道共 12 个片区 PS 目标,获取了研究区 2006—2010 年地表垂直形变速度场.分析表明:(1)研究区大范围处于下沉状态,形成以北京、廊坊、天津、沧州、泊头—德州等城市为中心向外扩展的地表沉降发展态势,几个沉降中心的平均沉降速率分别达到 -34.7 mm/a、 -26.3 mm/a、 -64.2 mm/a、 -34.6 mm/a 和 -37.7 mm/a;(2)地表沉降的空间分布特征表明,城市工业生产和生活抽取地下水是地表沉降的主要诱因,农业灌溉和油气开采是导致华北平原大范围地表沉降的另一个重要因素;(3)研究区最大沉降带沿北北东向展布,与区内断裂分布一致,表明沉降的空间分布受到断裂带控制;(4)利用地表同期一等水准测量成果检验了本研究结果,精度达到 4.72 mm,表明本文提出的数据处理策略能够满足大时空尺度地表形变监测的需求.

关键词 多轨 PSInSAR; 数据处理策略; 基准联接; 大空间尺度; 地表垂直形变场

doi:10.6038/cjg20141004

中图分类号 P228

收稿日期 2014-03-19, 2014-08-29 收修定稿

Monitoring vertical ground deformation in the North China Plain using the multitrack PSInSAR technique

LUO San-Ming¹, SHAN Xin-Jian², ZHU Wen-Wu¹, DU Kai-Fu¹,
WAN Wen-Ni¹, LIANG Hong-Bao¹, LIU Zhi-Guang¹

1 First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China

2 Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract In this paper, we present a method to reveal vertical deformation characteristics through reference transformation, data splicing and data fusion in multiple regions, which can overcome the shortage of traditional single-track PSInSAR techniques. In order to solve the problem that the ground deformation is not comparable, which is derived from various methods with reference difference in multi-tracks, vertical baseline difference in multi-tracks and reference

基金项目 地震科技星火计划项目(XH13036), 科研院所基本科研业务费(中国地震局地震研究所所长基金)(IS201266111), 地震行业科研专项(201308009)联合资助.

作者简介 罗三明,男,1965年生,高级工程师,主要从事大地测量数据分析、DInSAR 方法与应用方面研究. E-mail:luosanming@yahoo.com

PS difference in phase unwrapping, we calculate accurate transformation parameters and realize seamless connection of adjacent two frames through corresponding PS point analysis of the overlapped region and same point identification using the shortest distance algorithm based on proper weight. On the basis of algorithm research, we deduce the model to extract deformation information through data connection and reference transformation in multi-track PSInSAR technology, and then process the data collected in the North China Plain(115. 32°E—118. 79°E, 36. 81°N—40. 58°N) which include 3 different orbits and 12 frames, and obtain the vertical deformation of the study area for the period 2006—2010. The results indicate that the research area is in a sinking status, forming several subsidence centers including Beijing, Langfang, Tianjin, Cangzhou and Botou-Dezhou with average subsidence rates up to -34.7 mm/a, -26.3 mm/a, -64.2 mm/a, -34.6 mm/a and -37.7 mm/a, respectively. The spatial distribution of subsidence shows that groundwater extraction of industry and daily life are the main reasons, meanwhile agricultural irrigation and gas exploitation are the other primary causes. The major subsidence zones, trending NNE, coincide with the orientations of the fault zones, implying the subsidence distribution is controlled by the faults. These research results are verified by leveling measurements with errors about 4.72 mm, which shows that the data processing method in this paper can meet the requirement of large spatial scale deformation monitoring.

Keywords Multi-track PSInSAR; Data processing strategy; Datum connection; Large spatial scale; Vertical ground deformation

1 引言

地表沉降是一种缓慢变化的地质灾害,可形成一系列次生灾害链,与人类社会生产活动、经济建设、城市发展等重要因素密切相关。

我国的华北平原、长三角地区和汾渭盆地在过去几十年中是遭受严重地表沉降灾害的三个主要地区(He, 2005). 为跟踪地表沉降发展趋势,制定相应地表沉降防控措施,逐步开展了地下水动态监测、常规精密水准测量、基岩标和分层标监测. 这些监测手段精度高,但空间分布十分有限,不能获得与大范围地表沉降空间分布一致的监测信息. GPS 虽然能够获取大空间尺度地表运动信息(江在森等,2003;张跃刚等,2006;杨国华等,2007),但由于多种因素的限制,离散的 GPS 监测点不可能密集布设. 因此,对于大范围地表沉降监测,以上手段均难以获得空间连续分布的地表形变场信息。

近年来,研究人员基于干涉点目标分析思想陆续提出了多种新的 DInSAR 地表垂直形变场探测方法,其中,永久散射体差分干涉技术(permanent scatterers, PSInSAR)应用较为广泛(Funning et al., 2007; 屈春燕等,2011; 罗三明等,2012b, 2014). 该技术在相干散射体上跟踪干涉相位随时间的演变

过程,进而获取地表长期缓慢的变化信息. 意大利学者 Ferretti 等通过实验证明,PS 目标在经过 8 年的时间间隔后仍能保持稳定的散射特性(Ferretti et al., 2001, 2002).

PSInSAR 技术已在火山研究(Hooper et al., 2004, 2007)、形变探测(Decriem et al., 2010; Chang et al., 2010; 罗三明等, 2012b)、地表沉降(郭炳跃等, 2011; 罗三明等, 2014)等领域取得了大量研究成果. 对已有研究结果的不完全分析显示,该方法一般基于一个片区(Frame)的地表垂直形变场空间分布信息(如 ASAR 卫星的标准范围为 $100\text{ km} \times 100\text{ km}$),往往不能满足大空间尺度形变场研究. 如华北平原、长三角和汾渭盆地地表沉降面积分别达到 48550 km^2 (何庆成等, 2006), 10000 km^2 (郭坤一等, 2003)和 7000 km^2 (地球杂志, 2012).

如何对 PSInSAR 技术进行进一步延伸与改进,以适应更大空间尺度地表形变场研究需要,中外学者已作了探索性工作. 比如,Ge 等利用 PSInSAR 方法分析了渤海湾大范围地表形变场(Ge et al., 2010); Casu 等反演了美国内华达州 $600\text{ km} \times 100\text{ km}$ 地表垂直形变场(Casu et al., 2008); 在 2011 年的 Fringe 研讨会上,Adam 展示了利用 PSInSAR 技术获得的大时空尺度地表形变信息的研究成果(Adam, 2011); 荷兰和意大利学者利用 PSInSAR

技术分别分析了荷兰全境和整个意大利半岛地表形变场变化规律(Cuenca et al., 2011). 但这些研究成果目前仅限于会议报告, 主要技术流程还不可获取.

本研究采用 PSInSAR 技术解析了华北平原 3 个轨道 12 个独立片区共 272 景 ASAR 重轨数据, 通过对不同片区的 PSInSAR 技术结果进行基准转换与数据拼接, 获取了该区域 2006—2010 年约 12 万 km² 地表垂直连续形变速度场(注: 华北地区的地表形变主要在垂直方向, 而 ASAR 的成像几何也主要反映的是垂向分量, 因此本文的 LOS 形变主要反映的是垂向形变), 并利用同期地表水准测量结果对本文提出的数据处理策略获得的结果进行了比较.

2 方法

采用 PSInSAR 方法进行多轨干涉数据的处理, 目前主要还是按照不同片区分别处理. PSInSAR 方法需要对同一片区重轨数据确定一期主影像, 把其余影像作为辅影像与之配准. 由于不同轨道(Track)主影像选取的参考基准不一致, 不同片区 PS 目标反演的地表形变场因时间参考点的不同而在基准上必然存在差异; 在相位解缠过程中, 每个独立片区具有自己的参考 PS 目标, 使得各片区反演的地表变化信息在空间上存在一定误差; 不同片区的干涉数据因获取时间不同、地理位置不同, 其大气效应影响程度也就不同; 不同轨道的垂直基线不同而产生的轨道误差也不相同等等. 这些主要因素使得不同片区地表形变场呈分块状态, 相邻片区在空间上存在“错位”(图 1b), 各片区不能构成一个连续场. 基准转换与数据拼接就是要消除以上多项误差对不同片区的基准产生的“错位”现象, 将不同轨道表示的形变场转换到同一个参考基准上, 形成一个连续的曲面(图 1c).

2.1 同名点的提取

所谓同名点是指同一地物在重叠区内不同影像对应的 PS 点. 理论上, 相邻片区重叠区内的 PS 点均应是同名点, 位于相邻片区同名点间的距离应为 0. 但由于影像上单个象元反射类型及反射角度的不同, 此时的 PS 点在不同影像里的位置不一定完全相同, 甚至是不同的地物对应的 PS 点, 它们之间的距离一般不为 0. 因此, 本文采取迭代最近点法则提取同名点, 并剔除离群值.

设相邻两个轨道的 PS 目标构成的点集分别为 A 和 B , 其重叠部分的点集分别为 U 和 V (图 1a), 点

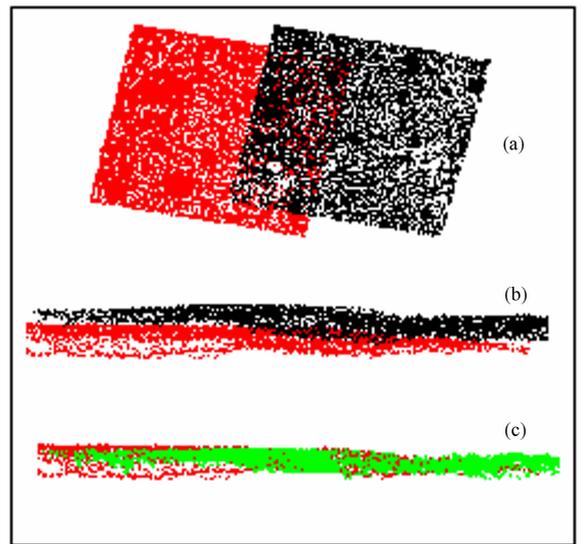


图 1 相邻两轨道 PSInSAR 结果在重叠区域产生的差异 (a) 相邻两个轨道 PS 目标的俯瞰图; (b) 两轨道重叠部分侧视图; (c) 配准后两轨道重叠部分侧视图, 红色点集与黑色点集分别为相邻两片区 PS 点, 绿色点集为 (b) 中黑色 PS 点经过配准后生成的新的 PS 点集.

Fig. 1 Differences between adjacent two tracks of PSInSAR in the overlapped region

(a) Aerial view of two adjacent tracks of PS target; (b) Lateral view to the overlapped region; (c) Lateral view of the overlapped region after registration.

$\mathbf{r}_1(x_1, y_1, z_1)$ 和点 $\mathbf{r}_2(x_2, y_2, z_2)$ 为位于点集 U 和 V 中的同名点, 两点之间的距离为

$$d(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (1)$$

根据公式(1), 通过迭代计算可以生成两个新的点集 $P = \{p_i\}$ 和 $X = \{x_i\}$, 即点集 A 和 B 的公共部分. 设点集 P 和 X 中 PS 的个数分别为 N_p 和 N_x , 这里有 $N_p = N_x = N$, 根据迭代最近点原则, 点集 P 和 X 须满足条件

$$d(p_i, X) = \min d(p_i, x_j), (i, j \in 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

即, 通过公式(2)建立点集 P 与 X 中一一对应的同名点点集, 生成最小点距集 d_i .

利用公式(1)生成的点集 P 和 X 中的点在满足公式(2)的情况下, 但有可能大于单个象元的分辨率, 这样的点不视为同名点, 应予以剔除. 因此, 在识别同名点的过程中, 在考虑点间距离最小的同时, 还需要考虑 SAR 影像的分辨率.

2.2 基准转换参数的计算

(1) 点距 d_i 权的确定

不同轨道影像的成像时间不同, 地表同一地物的反射类型和反射角度可能发生变化, 导致该地物在不同轨道影像上对应的 PS 点的位置可能存在差

异. 因此, 根据 2.1 节介绍的方法获得的点距集 d_i 的大小可能不同, 在计算转换参数时它们的贡献存在差异. 为了提高计算转换参数的精度, 需要引进 d_i 的权 w_i , 并定义 w_i 为

$$w_i = 1 - \frac{d(p_i, x_i)}{d_{\max}}, \quad (3)$$

式中, $d(p_i, x_i)$ 由公式(2)求得, d_{\max} 为点距集 d_i 中的最大值, 即 $d_{\max} = \max(d_i)$.

(2) 计算点集 P 与 X 的协方差阵

设点集 P 和 X 的质心分别为 μ_p 和 μ_x , 则:

$$\mu_p = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i p_i, \quad \mu_x = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i x_i,$$

式中, $W = \sum_{i=1}^N w_i$.

根据 μ_p 和 μ_x 构建点集 P 与 X 的协方差阵为

$$\Sigma_{px} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N [(\omega_i p_i - \mu_p)(\omega_i x_i - \mu_x)^T]$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

根据旋转参数 \mathbf{q}_R 和平移参数 \mathbf{q}_T , 构建点集 P 与 X 的转换参数 \mathbf{q} :

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_R \mid \mathbf{q}_T]^T. \quad (9)$$

2.3 数据的拼接

为了提高点集 A 与 B 基准拼接的精度, 需要获得点集 P 与 X 的最佳转换参数. 为此, 根据下式计算最小均方差:

$$f(\mathbf{q}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - \mathbf{R}(\mathbf{q}_R) p_i - \mathbf{q}_T\|^2, \quad (10)$$

并使得 $f(\mathbf{q})$ 最小.

设点集 A 为参考点集, B^* 为点集 B 经过配准后生成的新的点集, 则有:

$$B^*_{n \times 3} = \mathbf{R}_{3 \times 3} B^T_{3 \times n} + \mathbf{q}_T_{3 \times 1}, \quad (11)$$

由公式(11)获得的点集 B^* 与 A 实现了基准的转换与拼接, 二者构成的形变场形成了一个连续的曲面(图 1c).

3 华北平原 SAR 数据处理与结果分析

3.1 数据选取

位于华北平原的研究区大范围处于沉降状态, 北京、天津、廊坊、沧州等老沉降中心地带沉降速率

$$= \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i [p_i, x_i^T] - \mu_p \mu_x, \quad (4)$$

由协方差阵 Σ_{px} 构建 4×4 阶对称矩阵 $\mathbf{Q}(\Sigma_{px})$

$$\mathbf{Q}(\Sigma_{px}) = \begin{pmatrix} \text{tr}(\Sigma_{px}) & & & \Delta^T \\ & \Delta & & \\ & & \Sigma_{px} + \Sigma_{px}^T - \text{tr}(\Sigma_{px}) \mathbf{I}_3 & \\ & & & \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中, \mathbf{I}_3 为 3×3 阶单位矩阵, $\Delta = [C_{23}, C_{31}, C_{12}]^T$, $C_{ij} = (\Sigma_{px} - \Sigma_{px}^T)_{ij}$.

(3) 转换参数的计算

首先计算 $\mathbf{Q}(\Sigma_{px})$ 的特征向量和特征值, 其中最大特征值对应的特征向量即为旋转参数 \mathbf{q}_R , 它的表达式为

$$\mathbf{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T, \quad (6)$$

本文采用四元数法计算 \mathbf{q}_R , 且 $q_0 \geq 0, q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$.

而平移参数 \mathbf{q}_T 为

$$\mathbf{q}_T = \mu_x - \mathbf{R}(\mathbf{q}_R) \mu_p, \quad (7)$$

式中, \mathbf{R} 为根据公式(6)构建的 3×3 阶矩阵:

处于较高发展态势, 以城市为中心已扩展至整个华北平原. 在降雨并不充沛的华北平原, 大范围抽汲地下水是地表沉降的主要因素. 本研究选取华北平原 (115.32°E — 118.79°E , 36.81°N — 40.58°N) 作为多轨 PSInSAR 技术进行地表垂直形变场监测实验区(图 2), 采用 StaMPS (Stanford method for persistent scatterers) 方法 (Hooper et al., 2007) 解析 PS 目标.

实验数据是从欧空局申请的 Envisat ASAR 干涉数据, 时间跨度为 2006—2010 年, 涉及 175、218 和 447 三个轨道 12 个片区共 272 景数据(图 2). 所有数据均为降轨数据, VV 极化. 3 个轨道数据覆盖华北平原约 12 万 km^2 , 干涉参数如表 1 所示.

表 1 显示, 12 个独立片区重轨数据垂直基线大部分在 500 m 左右, 多普勒质心频率在 250 Hz 上下. 根据 PSInSAR 方法分析结果(图 3), 从北京—廊坊—天津到任丘、沧州经泊头、衡水、德州到南宫, 12 个片区重轨数据在 5 年时间内保持了良好的干涉性, 较为完整地揭示了研究区地表垂直形变场空间分布特征.

华北地区一等精密水准测量的周期为 3~5 年甚至更长, 因而我们无法通过同期水准观测成果对整个研究区的 PSInSAR 方法获得的地表形变场结

表 1 ASAR 雷达数据:垂直基线、时间长度、多普勒质心频率

Table 1 Interferometric parameters (perpendicular baseline, date length, Doppler centroid) of ASAR data

序号 No	轨迹号 Track	轨道号 Orbit	帧号 Frame	成像日期 During	主影像 Master	垂直基线 B_{\perp} (m)	多普勒质心 频率(Hz)
1	175	20770~44818	2799	2006—2010	20090419	-30~511	259~281
2		20770~44818	2817	2006—2010	20090208	64~826	247~296
3		20770~44818	2835	2006—2010	20090524	-308~251	237~283
4		20770~44818	2853	2006—2010	20090524	-305~500	238~270
5	218	23318~44861	2799	2006—2010	20081029	-452~793	255~287
6		23318~44861	2817	2006—2010	20080716	-553~695	247~281
7		21815~44861	2835	2006—2010	20080611	-405~382	250~273
8		21815~44861	2853	2006—2010	20081029	-323~457	234~267
9	447	26052~45090	2799	2006—2010	20090227	-306~457	265~289
10		26052~45090	2817	2006—2010	20080801	-285~553	258~288
11		26052~45090	2835	2006—2010	20080801	-286~544	245~273
12		26052~45090	2853	2006—2010	20080801	-326~534	245~267



图 2 实验区 PS 片区空间分布图(T 为轨道号, F 为片区号)

Fig. 2 Distribution of PS frames in the experimental area
(T is track number, F is frame number)

果进行验证。从上世纪 80 年代开始,天津地区于每年 10—12 月进行一次地表沉降一等水准测量,具有良好的周期性和连续性,与本文采用的 SAR 数据具有较好的同步性。因此,我们对本文提供的数据处理策略反演的地表形变场的验证采用的是天津地区 2006—2010 年的同期一等水准测量结果。

3.2 处理结果

利用 StaMPS 方法(Hooper et al., 2007; 罗三

明等, 2012b), 分别对 12 个独立片区完成 PS 目标的识别, 根据本文提供的数据处理策略, 对 12 个片区的 PS 目标进行基准连接, 构成由 12 个片区组成的连续地表垂直形变速度场(图 3)。在研究区约 12 万 km^2 范围内, 共识别出 1202958 个 PS 目标, 每 km^2 包含约 10 个 PS, 该密度足以全面揭示整个研究区地表垂直形变场空间分布特征及其与该区内断裂的关系(图 4)。

图 5 为天津地区的 PS 目标与水准测量点在空间分布上的套合图。天津地区一等水准观测里程每年约 2000 km, 观测数据的平差计算以位于蓟县的基岩点为参考基准, 采用分期平差(罗三明等, 2012a)数学模型对 2006—2010 年每期观测值进行观测误差的消除或最大限度的弱化处理, 共获得 290 个具有同期观测成果的水准点。

由于 PS 目标的平均密度远大于水准点的密度, 为了对二者的结果进行比较, 我们采取了如下处理方法: 首先将水准测量平差结果投影到雷达视线向(Envisat ASAR 的视线向入射角为 23°), 再假设每个水准点周围 100 m 范围内地表形变梯度是一致的, 该范围内的 PS 目标与地表水准测量结果具有相同的形变梯度。根据该原则, 在 290 个具有同期观测成果的水准点中筛选出了 56 个满足该条件的水准点, 二者的比较见表 2。

为进一步分析 PSInSAR 方法反演结果的可靠性, 我们在图 5 中的 AB 和 CD 位置绘制了两个剖面, 图 6 为 PSInSAR 和水准二者反演的地表垂直形变速度场在两个位置上的剖面图。图 6 显示, 水准测

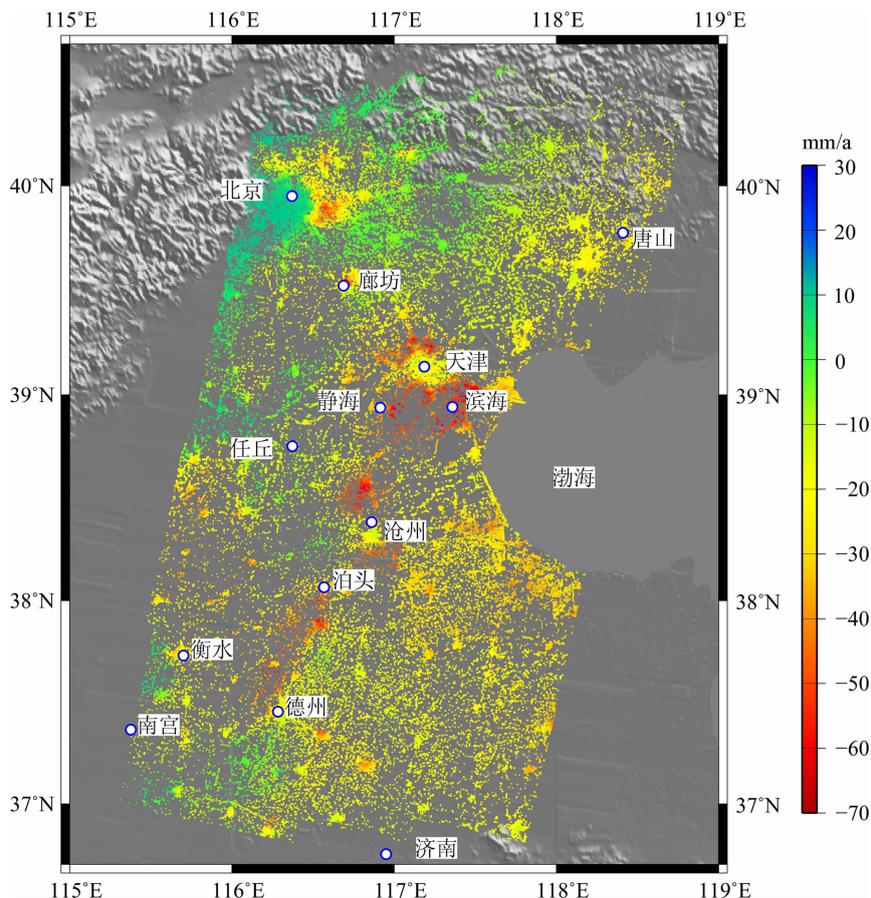


图3 华北平原 PS 目标速率空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of PS target rates in the North China Plain

量结果和 PSInSAR 方法反演结果在趋势上具有良好的 consistency.

3.3 可靠性评估

已有研究成果显示,在植被稀疏、岩石裸露的区域(如我国西部),PSInSAR 结果的精度可以达到 2 mm;在城市地区,虽然因人工建筑物较多而可以识别出较高密度的 PS 目标,但相应地干扰源也较多,因而降低了 PS 目标反演的地表形变信息的精度,一般情况下可达到 5 mm;在植被较厚、人工目标较少的地区,因可识别的、能满足良好干涉条件的相干体既少而且离散,PSInSAR 的精度一般在 1 cm 左右.

为了对 12 个片区拼接后的可靠性进行评估,我们计算了各重叠区同名点的标准差(表 3).由表 3 可以看出,对各片区进行拼接后,17 个重叠区同名点的标准差在 0.83~3.34 mm 之间,其中超过 3 mm 的有 3 个,说明各片区识别出的 PS 目标具有较高的质量,由此获得的大空间尺度地表形变场信息是可靠的.其中,精度最高的为研究区东部的 175 轨道,4 个片区的拼接精度均在 1 mm 以内.根据表

3 还可以看出,无论是同轨相邻片区(Frame)间的拼接(南北向拼接,表中前 3 列),还是不同轨道相邻片区区间的拼接(东西向拼接,表中后 2 列),研究区东部的拼接精度都要高于西部,这可能与研究区东、西部地表植被覆盖程度存在差异有关.

3.4 精度检验

根据表 2 统计,在 56 个水准点中有 37 个与 PSInSAR 方法反演结果的误差小于 5 mm,占总点数的 66%,有 2 个水准点结果与 PS 方法结果相差 8.9 mm.进一步计算可得中误差为 4.72 mm,满足我国对城市地面沉降观测 5 mm/km 的偶然中误差和 10 mm 的全中误差的精度指标要求(北京市测绘设计研究院,1999).

表 2 中,少数水准点与 PSInSAR 方法反演结果的差值较大,这可能与二者在空间上的分布位置和密度有关.一般情况下,在 SAR 图像上无法解析出水准测量点,即 PS 目标和水准测量采集的数据不在同一点上,尤其在地表垂直形变梯度较大的地区,位置偏差直接导致形变信息的不同,二者的差值就可能产生较大差异.由剖面图 6 可以看出,由于水准

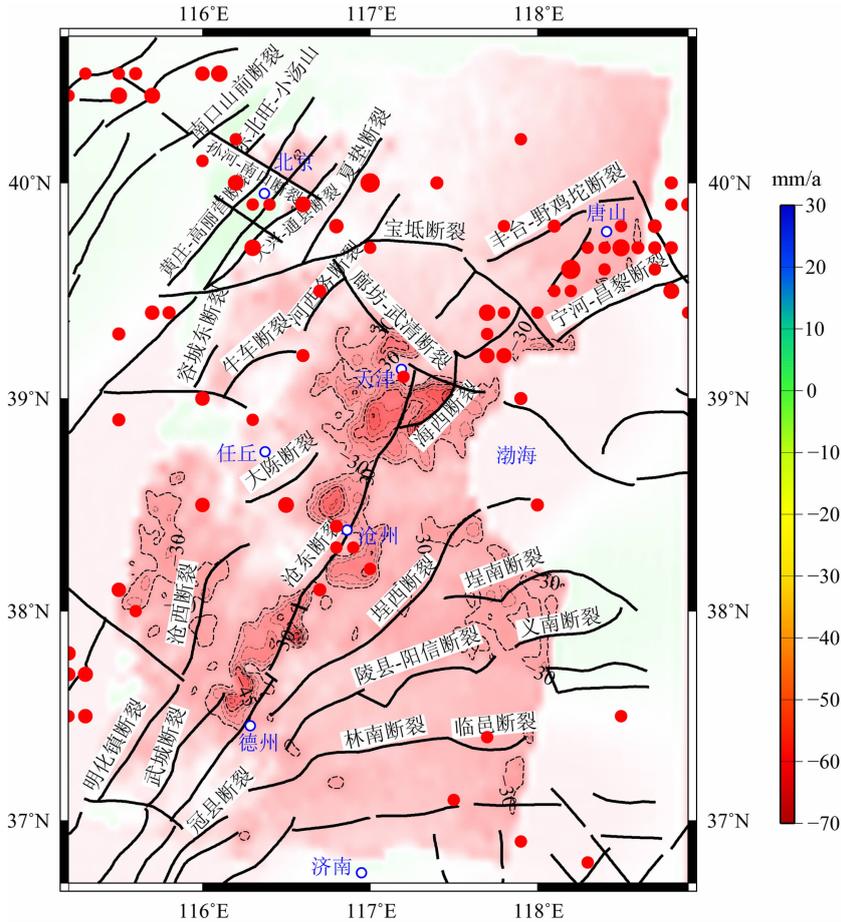


图 4 华北平原 PSInSAR 方法反演的地表垂直形变场速率与断裂空间分布(红色实心圆为 5 级以上地震)
 Fig. 4 Rates of vertical ground deformation derived from PSInSAR inversion, active faults and epicenters of earthquakes M5 or greater (red solid circles) in the North China Plain

表 2 水准观测结果(LOS)与 PSInSAR 方法反演结果对比(2006—2010)(单位:mm)

Table 2 Comparison of PSInSAR and leveling measurements in 2006 to 2010 (unit:mm)

序号	水准结果	PS 结果	误差	序号	水准结果	PS 结果	误差	序号	水准结果	PS 结果	误差
1	-3.3	-2.3	-1.0	20	-49.5	-43.2	-6.3	39	-30.3	-39.2	8.9
2	-10.1	-10.9	0.8	21	-55.1	-46.2	-8.9	40	-29.1	-37.3	8.2
3	-9.4	-11.9	2.5	22	-50.6	-43.1	-7.5	41	-80.1	-76.0	-4.1
4	-10.8	-14.2	3.4	23	-33.6	-33.2	-0.4	42	-20.7	-16.7	-4.0
5	-6.2	-1.7	-4.5	24	-40.5	-44.8	4.4	43	-16.0	-18.8	2.8
6	-8.0	-10.0	2.0	25	-15.2	-16.5	1.2	44	-60.2	-65.2	5.0
7	-10.1	-10.7	0.6	26	-16.2	-17.4	1.2	45	-66.0	-71.9	5.9
8	-33.8	-34.9	1.1	27	-20.1	-22.1	2.1	46	-39.3	-36.5	-2.8
9	-24.9	-21.7	-3.3	28	-20.5	-21.4	0.8	47	-44.1	-46.3	2.2
10	-53.4	-55.3	1.9	29	-17.4	-17.6	0.2	48	-30.8	-36.5	5.7
11	-56.7	-58.0	1.3	30	-12.5	-16.6	4.2	49	-41.9	-33.7	-8.2
12	-45.7	-47.6	1.9	31	-12.7	-18.5	5.8	50	-42.4	-33.7	-8.7
13	-12.1	-13.6	1.5	32	-20.6	-24.6	3.9	51	-18.9	-25.0	6.1
14	-16.5	-14.7	-1.7	33	-30.7	-29.7	-1.0	52	-19.2	-24.3	5.1
15	-26.8	-26.4	-0.4	34	-33.4	-37.7	4.3	53	-35.3	-41.2	5.9
16	-30.0	-32.8	2.8	35	-23.5	-28.0	4.5	54	-11.9	-20.3	8.3
17	-62.8	-59.4	-3.4	36	-22.4	-26.7	4.3	55	-30.5	-38.0	7.5
18	-64.3	-60.5	-3.8	37	-10.9	-14.3	3.4	56	-26.8	-23.9	-2.9
19	-51.3	-43.2	-8.1	38	-38.6	-47.2	8.6				

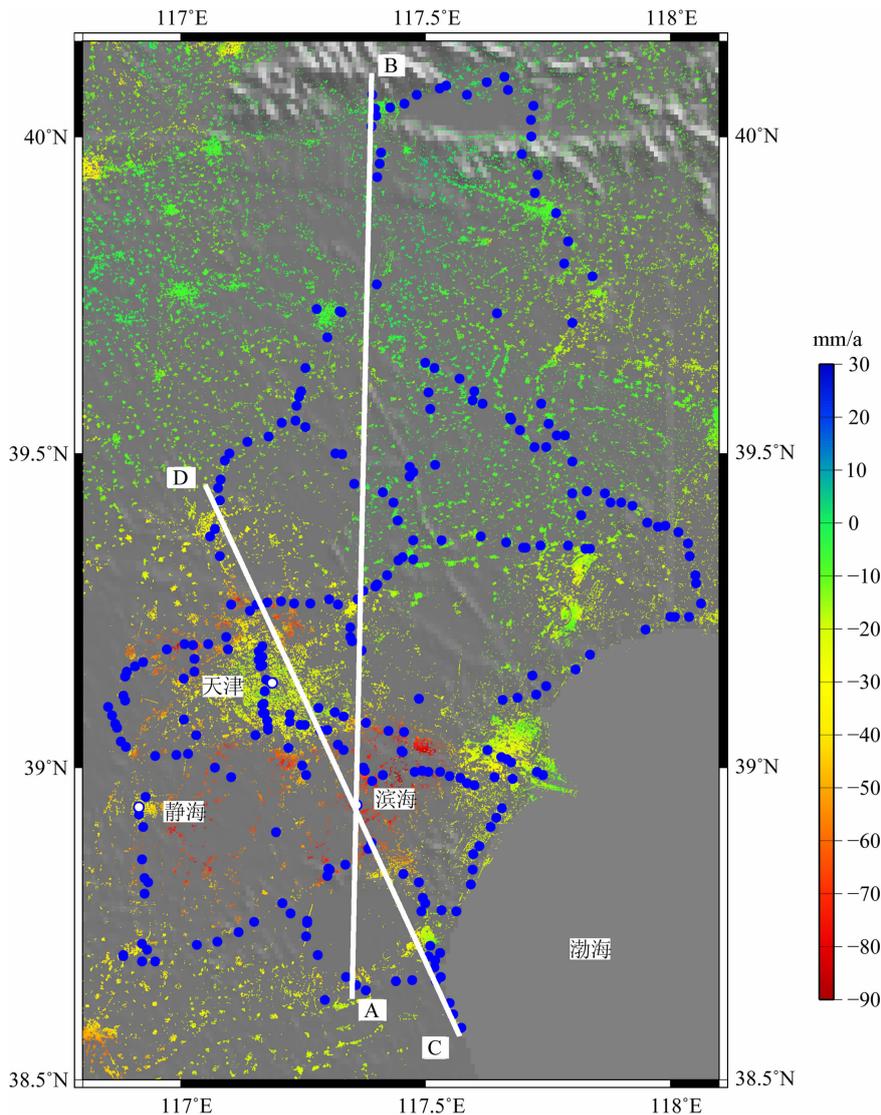


图 5 天津地区 PSInSAR 与同期水准测量结果套合图(蓝色实心圆为水准点空间分布, AB 与 CD 为两个剖面的位置)

Fig. 5 Nested map of PSInSAR and coeval leveling measurements (Blue solid circles denote benchmarks. AB and CD are locations of two profiles)

表 3 重叠区同名点标准差(单位:mm)

Table 3 Standard deviations of corresponding PS in overlapped regions (unit: mm)

Frame	Track				
	218	447	175	218~447	447~175
2799				2.37	2.27
2817	2.49	1.59	0.89	3.33	2.45
2835	2.05	2.63	0.86	3.34	1.88
2853	3.23	2.55	0.83	2.64	1.88

点的密度要远小于 PS 目标的密度,速度场剖面在经过沉降中心地带时二者的差值明显偏大.这也说明:对于不同的对地观测手段获得的观测结果,一般宜进行趋势间的相互比较,如果将其中一种结果作为

标准去衡量其它观测手段获得的结果可能有失严谨.

3.5 结果分析

华北平原分布广泛的第四纪松散沉积物构成了该区地下水含水系统,经历了第四纪以来的新构造运动,形成一个水文地质结构复杂而又相互联系的地下水系(何庆成等,2006).本研究结果显示(图4),沉降区主要沿两个方向分布,一个沿廊坊—天津市—滨海新区呈北西向分布,另一个沿天津市—静海—沧州—泊头—德州呈北北东向分布,而天津位于两个沉降带的交汇部位.天津地区地表主沉降区集中在工业用水相对集中的津南区—滨海区一带,两地中心沉降区平均沉降速率分别达到 -61.6 mm/a和 -66.7 mm/a,这可能与近10多年来天津地区工业重心向津南和滨海转移导致地下水

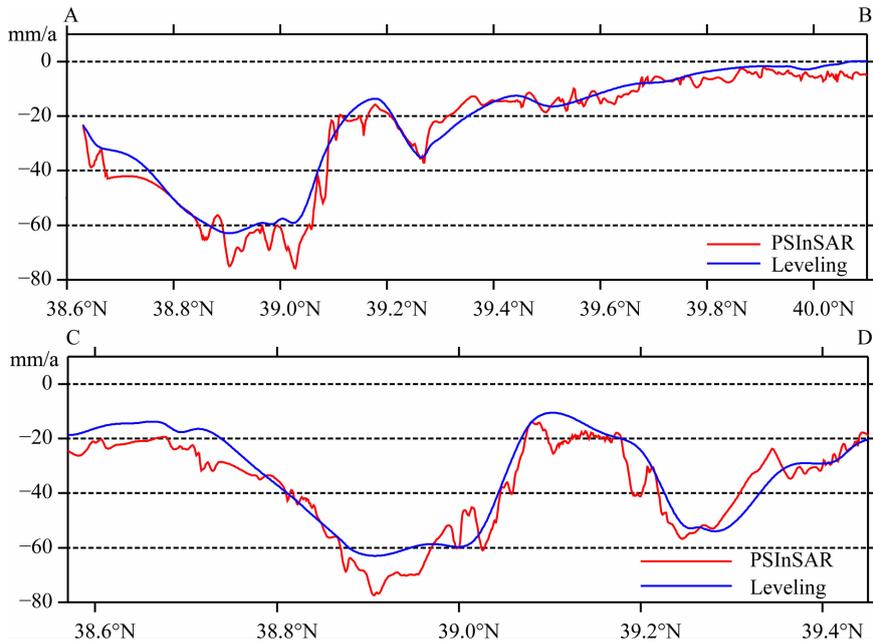


图 6 PSInSAR 结果与水准结果剖面 AB 和 CD 的比较

Fig. 6 Comparison of PSInSAR and leveling measurements on profiles AB and CD

需求扩大有关。而位于沧州—泊头—德州一带,年平均沉降速率分别达到 -34.7 mm/a、 -37.7 mm/a、 -29.3 mm/a,地表沉降速率仍处于较高发展态势。北京东部沉降区 2006—2010 年沉降量为 173.5 mm,年平均沉降速率达到 -34.7 mm/a,表明北京东部地区地表沉降趋于加速发展趋势。

从图 4 可已看出,两个地表沉降带恰好与北向的廊坊—武清断裂,以及北北东向的沧东断裂位置吻合。特别是在天津城区、沧州、泊头—德州等地由多个沉降漏斗区构成了一条北北东向的主沉降带。华北地区自有记载以来构造活动一直很强烈,是中国大陆东部主要地震活动区,从历史地震来看,该区发生过多次 5 级以上地震,除唐山老震区外,其余地震大多发生在断裂附近,说明研究区地震活动与断裂的分布确实存在一定联系。地下断层及周边发育着众多裂隙,而地下水沿裂隙存储、分布和迁移,地下水位的变化可能通过改变断层变形行为方式而影响区域构造变形图像。地下水长时间抽取,造成局部地下水位下降,地表下沉,而周边地下水会沿着裂隙快速迁移补充,这可能在一定程度上反映了地表沉降带与断裂带吻合的现象,同时也反映出由地下水开采导致的地表沉降受断层分布的控制。

4 结论

本研究选取的 ASAR 干涉数据,其重轨周期最

短为 35 天,采用 PSInSAR 和迭代最近点算法处理,可以获得大面积地表垂直形变速度场,从信息的时间频度和空间分布上大大弥补了常规对地观测时空信息不足的缺点。通过在华北平原应用,并得到以下认识和结论:

(1)提出了一种基于基准连接的多轨 PSInSAR 获取大空间尺度地表形变场缓慢变化过程的有效方法,扩展了 PSInSAR 技术在空间尺度应用方面的局限性,使大面积获取 PS 点成为可能。

(2)对 17 个重叠区同名点误差统计显示,标准差在 0.83~3.34 mm 之间,说明各片区识别出的 PS 目标具有较高的质量,获得的大空间尺度地表形变场具有较高的可靠性。进一步分析表明,研究区东部的拼接精度都要高于西部,说明东部的 PS 目标的质量要高于西部,这可能与东西部地表植被存在差异有关。

(3)采用 ASAR 干涉数据,通过本研究提出的处理策略,获取了华北平原约 12 万平方公里 2006—2010 年间的地表垂直形变速度场及其空间分布特征。结果表明,以北京、廊坊、天津、沧州、泊头—德州等城市为中心,地表沉降已扩展至整个华北平原,沉降中心区 5 年内的地表沉降量分别达到 174、132、321、173 mm 和 188 mm,表明实验区地表沉降处于较高发展态势。

(4)所获得地表垂直形变速度场与同期一等水准测量结果进行了验证,精度达到 4.72 mm,为大

时空尺度地表垂直形变场和跨地区、跨区域大型交通枢纽工程变形等监测提供了一种行之有效的观测新途径。

(5)两个地表沉降带分布与北向的廊坊—武清断裂和北北东向的沧东断裂位置吻合。这可能与地下断层及周边发育着众多裂隙有关。地下水沿裂隙存储和迁移可能通过改变断层变形行为方式而影响区域构造变形图像,反映出由地下水开采导致的地表沉降受断层分布的控制。

致谢 感谢欧洲空间局提供的 ENVISAT ASAR 数据和卫星精密轨道数据(申请号:13762)。

References

- Adam N, Gonzalez F R, Parizzi A, et al. 2011. Wide area persistent scatterer interferometry: algorithm and examples. *Fringe* 2011. Frascati, Italy; IEEE, 1857-1860.
- Beijing Institute of Surveying and Mapping. 1999. Code for Urban Survey (CJJ 8-99). Beijing: China Building Industry Press(in Chinese).
- Casu F, Manzo M, Pepe A, et al. 2008. SBAS-DInSAR analysis of very extended areas: first results on a 60000 km² test site. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(3): 438-442.
- Chang C P, Yen J Y, Hooper A, et al. 2010. Monitoring of surface deformation in northern Taiwan using DInSAR and PSInSAR techniques. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 21(3): 447-461.
- Cuenca M C, Hanssen R, Hooper A, et al. 2011. Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis. // *Fringe* 2011. Frascati, Italy.
- Decriem J, árnadóttir T, Hooper A, et al. 2010. The 2008 May 29 earthquake doublet in SW Iceland. *Geophysical Journal International*, 181(2): 1128-1146.
- Earth. 2012. Land subsidence in the Fen Wei Basin. <http://www.diqiuzazhi.com>.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2002. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212.
- Funning G J, Bürgmann R, Ferretti A, et al. 2007. Creep on the Rodgers Creek fault, northern San Francisco Bay area from a 10 year PS-InSAR dataset. *Geophysical Research Letters*, 34(19): L19306.
- Ge D Q, Zhang L, Wang Y, et al. 2010. Merging multi-track PSI result for land subsidence mapping over extended area. // *Proceeding of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010)*. Honolulu, Hawaii, USA, 3522-3525.
- Guo B Y, He M, Liu J D. 2011. Monitoring the ground subsidence in nantong city with the ps-insar technology. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*. (in Chinese), 22(4): 103-107.
- Guo K Y, Yu Z J, Fang Z, et al. 2004. Survey and Evaluation of groundwater resources and geological hazard in the Yangtze River Delta area. *Seminar of Geological environment of coastal zones and city development*. (in Chinese). 2004, Tianjin.
- He Q C. 2005. Land Subsidence in the North China Plain(NCP). // *Proc. the 7th International Symposium on Land Subsidence* (in Chinese). 18-29.
- He Q C, Liu W B, Li Z M. 2006. Land Subsidence Survey and Monitoring in the North China Plain. *Geological Journal of China Universities*. (in Chinese), 12(2): 195-209.
- 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(23), doi: 10.1029/2004GL021737.
- Hooper A, Segall P, Zebker H. 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 112(B7), doi: 10.1029/2006JB004763.
- Jiang Z S. 2003. Horizontal strain field and tectonic deformation of china mainland revealed by preliminary gps result. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 46(3): 352-358.
- Luo S M, Dong Y H, Han Y P, et al. 2012a. Comparison of Adjustment Results Both of Dynamics and Statics for Repeated Levelling Networks. *Journal of Geodesy and Geodynamics*. (in Chinese), 32(1): 97-100+122.
- Luo S M, Du K F, Chang L, et al. 2014. Ground subsidence rates of Beijing area constrained by PS-InSAR analysis. *Journal of Geodesy and Geodynamics*. (in Chinese), 34(1): 43-46.
- Luo S M, Yang G H, Dong Y H, et al. 2012b. Displacement field characteristics on L' Aquila Earthquake from PSInSAR time series. *Progress in Geophysics*. (in Chinese), 27(4): 1307-1315.
- Qu C Y, Shan X J, Song X G, et al. 2011. The PSInSAR technique and its application to the study on crustal deformation of the Haiyuan fault zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(4): 984-993.
- Yang G H, Jiang Z S, Liu G Y, Han Y P. 2007. Possible relation of horizontal movement field in north china to kunlun mountain Ms8.1 earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics*. (in Chinese), 27(2): 10-15.
- Zhang Y G, Shuai P, Hu X K, et al. 2006. Study on evolution of deformation field in north china area with gps data. *Journal of Geodesy and Geodynamics*. (in Chinese), 26(1): 36-41.

附中文参考文献

北京市测绘设计研究院. 1999. 城市测量规范(CJJ 8-99). 北京: 中

- 国建筑工业出版社.
- 地球杂志. 2012. 《汾渭盆地地面沉降》, [http:// www. diqiuzazhi. com](http://www.diqiuzazhi.com).
- 郭炳跃, 何敏, 刘建东. 2011. 利用 PS-InSAR 技术监测南通市区地面沉降. 地质灾害与环境保护, 22(4): 103-107.
- 郭坤一, 于军, 方正等. 2003. 长江三角洲地区地下水资源与地质灾害调查评价. //2004 年海岸带地质环境与城市发展研讨会论文集. 天津: 中国地质调查局.
- 何庆成, 刘文波, 李志明. 2006. 华北平原地表沉降调查与监测. 高校地质学报, 12(2): 195-209.
- 江在森, 马宗晋, 张希等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形. 地球物理学报, 46(3): 352-358.
- 罗三明, 董运洪, 韩月萍等. 2012a. 复测水准网动态平差与静态平差结果的比较. 大地测量与地球动力学, 32(1): 97-100, 122.
- 罗三明, 杜凯夫, 畅柳等. 2014. 基于 PS-InSAR 方法反演北京地区地表沉降速率. 大地测量与地球动力学, 34(1): 43-46.
- 罗三明, 杨国华, 董运洪等. 2012b. 利用 PSInSAR 时间序列研究拉奎拉地震位移场变化特征. 地球物理学进展, 27(4): 1307-1315.
- 屈春燕, 单新建, 宋小刚等. 2011. 基于 PSInSAR 技术的海原断裂带地壳形变初步研究. 地球物理学报, 54(4): 984-993.
- 杨国华, 江在森, 刘广余等. 2007. 华北地区的水平运动场与昆仑山 8.1 级地震的可能关系. 大地测量与地球动力学, 27(2): 10-15.
- 张跃刚, 帅平, 胡新康等. 2006. 从 GPS 观测看华北地区的形变场演化. 大地测量与地球动力学, 26(1): 36-41.

(本文编辑 张正峰)