

# 利用 PSInSAR 方法反演大时空尺度地表沉降速率

罗三明<sup>1</sup> 杜凯夫<sup>1</sup> 万文妮<sup>1</sup> 付黎明<sup>1</sup> 李永坤<sup>1</sup> 梁福逊<sup>1</sup>

1 中国地震局第一监测中心,天津,300180

**摘要:**通过时间基准和空间基准的连接,对 PSInSAR 方法进行了扩展,对覆盖华北平原约 20 万 km<sup>2</sup> 的 500 余景 Envisat ASAR 数据进行了处理,获取了该地区 2006~2010 年的地表沉降速率。分析表明,华北平原多个沉降中心沉降速率处于较高发展态势,从北京-廊坊-天津到任丘、沧州、泊头、衡水、德州、南宫,再到邯郸,地面沉降已连成一片;天津市的静海-滨海地面沉降最为突出,两地沉降中心区的平均沉降速率分别达到 62 mm/a 和 67 mm/a,北京东部、沧州、泊头-衡水-德州、邯郸等老沉降区的沉降速率分别达到 36 mm/a、34 mm/a、37 mm/a、29 mm/a。利用天津地区同期水准测量结果检验了本文的研究结果,差值均小于 10 mm,表明 PSInSAR 方法反演结果与水准测量获得的结果是一致的。

**关键词:**华北平原;时间基准和空间基准;地表缓慢变化;PSInSAR;地表沉降速率

中图法分类号:P237.9

文献标志码:A

地表沉降是一种缓慢变化的地质灾害,1898 年日本最先在新泻发现地表沉降,随后在美国的圣可塞和我国的上海、天津也发现了地表沉降现象。直到 1936 年墨西哥的 J. A. Guevas 和英国的 T. E. Longfield 发表了《墨西哥城的地表沉降问题》和《伦敦地表沉降》论文后,地表沉降才引起国际社会的广泛关注,对地表沉降的机理、监测技术、防控措施等方面的研究工作在地表沉降比较严重的国家,如美国、日本、意大利等国开始受到重视,对地表沉降的监测逐步展开。

传统的监测手段主要有地下水动态监测、常规精密水准测量、基岩标和分层标监测。这些监测手段虽然精度高,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 能够获取大空间尺度地表运动信息<sup>[1-2]</sup>,但离散的 GPS 监测点不可能密集布设,难以获得大空间连续分布的地表运动场。

常规星载合成孔径雷达差分干涉测量(differential Interferometric SAR, DInSAR)技术能够从面上反映地表的形变过程<sup>[3-5]</sup>,并可精确地获取地表沉降变化<sup>[6]</sup>。但对于长时间缓慢的地表形变过程而言,由于地表散射特性随时间的变化,使时间失相关,干涉纹图的相干性因而随时间减弱

甚至丢失,导致形变测量的失败,尤其是在监测长期积累的形变量时变得十分困难。这些问题制约了 DInSAR 手段在形变监测方面的进一步应用。

为了克服这些困难,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 地表形变探测方法,基于永久散射体(permanent scatterers, PS)的技术就是其中的一种。该技术能够克服常规差分干涉监测长期地表形变所面临的时间失相干、几何失相干和大气状态波动的负面影响,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。

PS 技术已在火山研究<sup>[7-8]</sup>、形变探测<sup>[9-10]</sup>、地表沉降<sup>[11-12]</sup>等领域取得了大量研究成果。对已有 PS 方法研究结果的不完全分析显示,PSInSAR 技术获得的地表运动场空间尺度一般不超过 100 km×100 km。本文在已有研究的基础上,采用 PS 方法对华北平原近 20 万 km<sup>2</sup> 共 500 余景 EN-VISAT 重轨数据进行了分析,获得了 22 个片区的地表沉降信息。采用相关数学模型,对这 22 个独立片区根据时间基准和空间基准进行了统一分析处理,获取了研究区 2006~2010 年空间连续分布的地表沉降平均速度场,并利用地表同期水准测量结果进行了验证。

收稿日期:2013-11-11

项目来源:地震科技星火计划资助项目(XH13036);中国地震局地震研究所所长基金资助项目(IS201266111)。

第一作者:罗三明,高级工程师,主要从事大地测量数据分析、DInSAR 方法与应用研究。E-mail: luosanming@yahoo.com

# 1 研究方法 with 数据处理

## 1.1 研究方法

本文采用基于相干点目标的 PS 技术,根据 PS 技术的处理方法和处理流程<sup>[7,8,10]</sup>,分别识别出 22 个片区的 PS 目标。为了使 22 标准帧表示的沉降速度场具有连续性,原则上需要 22 个标准

帧要在同一条连续的相位解缠路径下进行相位解缠。但由于每个标准帧主影像的获取时间不同(见表 1),因此很难确定一条经过 22 个标准帧的连续相位解缠路径。在实际处理中,往往分别处理各个片区,在相位解缠时每个帧具有各自的参考 PS。因此,不同帧获取的地表形变信息是不连续的。

表 1 ASAR 雷达数据垂直基线、时间长度和多普勒质心频率

Tab. 1 Interferometric Parameters(Perpendicular Baseline, Date Length, Doppler Centroid) of ASAR Data

序号	轨迹号	轨道号	帧号	成像日期	主影像	垂直基线/m	多普勒质心频率/Hz
1		20 770~44 818	2 799	2006~2010	20090419	-30~511	259~281
2	175	20 770~44 818	2 817	2006~2010	20090208	64~826	247~296
3		20 770~44 818	2 835	2006~2010	20090524	-308~251	237~283
4		20 770~44 818	2 853	2006~2010	20090524	-305~500	238~270
5		23 318~44 861	2 799	2006~2010	20081029	-452~793	255~287
6		23 318~44 861	2 817	2006~2010	20080716	-553~695	247~281
7	218	21 815~44 861	2 835	2006~2010	20080611	-405~382	250~273
8		21 815~44 861	2 853	2006~2010	20081029	-323~457	234~267
9		21 815~44 861	2 871	2006~2010	20080123	-234~530	232~258
10		28 328~44 861	2 889	2007~2010	20090701	-471~363	231~251
11		21 858~44 904	2 835	2006~2010	20090704	-368~429	251~273
12	261	21 357~44 904	2 853	2006~2010	20090704	-974~906	243~267
13		21 858~44 904	2 871	2006~2010	20090704	-969~916	231~255
14		21 357~44 904	2 889	2006~2010	20090704	-965~927	224~245
15		26 052~45 090	2 799	2007~2010	20090227	-306~457	265~289
16	447	26 052~45 090	2 817	2007~2010	20080801	-285~553	258~288
17		26 052~45 090	2 835	2007~2010	20080801	-286~544	245~273
18		26 052~45 090	2 853	2007~2010	20080801	-326~534	245~267
19		23 590~45 133	2 817	2006~2010	20090720	-377~562	258~282
20	490	23 590~45 133	2 835	2006~2010	20090720	-418~490	258~276
21		23 590~45 133	2 853	2006~2010	20090720	-412~485	249~272
22		23 590~45 133	2 871	2006~2010	20090720	-422~212	243~264

为了使不同帧反应的信息具有连续性,本文对不同片区 PS 目标进行时间基准和空间基准的统一处理,使得研究区的形变信息具有连续性和可比性。

### 1.1.1 时间基准的连接

PSInSAR 方法需要对同一片区重轨数据确定一期主影像,其余影像作为辅影像配准至主影像上<sup>[10]</sup>。由于不同轨道的重轨数据其主影像的获取时间不同,获得的地表信息由于时间参考点的不同而必然存在偏差。时间基准的连接就是要消除或最大程度地弱化这种偏差,使得不同轨道反演的地表信息具有同一个时间参考点。

本文利用拉格朗日插值法来确定 22 个标准帧统一的时间基准。拉格朗日插值法是用连接  $n+1$  个已知结点的  $n$  次多项式进行插值计算的方法,其优点就是能够充分利用全部或部分已知信息来估计未知数据。

设  $n+1$  个已知结点的  $n$  次多项式为:

$$P(x) = c_0x^n + c_1x^{n-1} + \dots + c_{n-1}x + c_n \quad (1)$$

此方程根据给出的  $n+1$  个结点的已知信息来确定式中的系数  $c_0 \sim c_n$ 。

设  $n+1$  个相异结点  $x_0, x_1, \dots, x_n$  上的未知函数的值为  $y_0, y_1, \dots, y_n$ ,按照式  $P_i(x) =$

$$\frac{\prod_{j \neq i} (x - x_j)}{\prod_{j \neq i} (x_i - x_j)}$$
可建立  $x$  的多项式  $P_i(x)$ 。当  $x = x_i$

时,  $P_i(x) = 1$ ; 当  $x = x_j (j \neq i)$  时,  $P_i(x) = 0$ 。将各  $P_i(x)$  乘以相应  $y_i$  值,取其总和即得到:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n P_i(x)y_i \quad (2)$$

式(2)即为拉格朗日插值函数,利用此函数可以确定任一时刻为统一的时间参考点。

### 1.1.2 空间基准的连接

每个片区因相位解缠空间参考 PS 不同,使得各片区的地表信息在空间分布上存在偏差。本

文采用重心法,按照加权最小二乘算法完成不同片区空间基准的统一处理,以消除该偏差。

设  $N$  为第  $k$  帧的 PS 个数,  $\Delta d_i (i=1, 2, \dots, N)$  为该帧第  $i$  个 PS 表示的雷达视线向 (LOS) 速率值, 则第  $k$  帧全部 PS 表示的该帧的速率重心  $C_k$  为:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta d_i \quad (3)$$

令  $M_k^2 = \sum_{i=1}^N (\Delta d_i - C_k)^2$ , 则第  $k$  帧 PS 表示的速率的标准差  $\sigma_k = \sqrt{\frac{M_k^2}{N}}$ , 该速率重心的权定义为

$P_k = \frac{1}{\sigma_k}$ 。如与第  $k$  帧相邻的帧数为  $j$ , 则  $j$  帧的权之和为第  $k$  帧的权, 即

$$P_{kj} = \sum_{k=1}^j P_k \quad (4)$$

设任意两相邻标准帧  $m$  和  $n$  的速率重心分别为  $C_m$  和  $C_n$ , 则有  $C_m = C_n - \Delta C_{nm}$ 。其中,  $\Delta C_{nm} = (C_n - C_m) + (\tilde{C}_n - \tilde{C}_m)$ 。 $C_m$  和  $C_n$  根据式(3)求得,  $\tilde{C}_m$  和  $\tilde{C}_n$  为经过时间基准处理后算出的第  $m$  帧和第  $n$  帧的速率重心。

如果  $p$  个重心可组成  $q$  个独立的误差方程, 并设  $\delta C$  为相应  $C$  的改正数, 则误差方程组为:

$$V = A\delta C - \Delta C \quad (5)$$

式中,

$$\begin{aligned} V &= [V_1 \quad V_2 \quad \dots \quad V_q]^T \\ \delta C &= [\delta C_1 \quad \delta C_2 \quad \dots \quad \delta C_p]^T \\ \Delta C &= [\Delta C_1 \quad \Delta C_2 \quad \dots \quad \Delta C_q]^T \end{aligned}$$

$A$  为误差方程组系数阵, 其元素由 +1、-1 和 0 组成。根据最小二乘  $V^T P V = \min$  原则, 由式(5)可组成相应法方程组:

$$W\delta C + U = 0 \quad (6)$$

式中,  $W = A^T P A$ ,  $U = A^T P \Delta C$ 。权阵  $P$  的元素根据式(4)求得。

方程(6)的系数阵  $W$  是奇异阵, 其行列式的值为零, 常规方法不能唯一地确定其解。本文采用修正的 Gram-Schmidt 正交化广义逆平差方法对式(6)进行解算<sup>[13]</sup>, 能够唯一确定其解。

## 1.2 数据选取

为了跟踪研究华北平原地表沉降的发展趋势, 在该区已有地面沉降研究的基础上<sup>[14-15]</sup>, 从欧空局订购了 2006~2010 年、175~490 共 5 个轨迹的 500 余景 ENVISAT ASAR 雷达干涉数据。5 个轨迹共包含 22 个重轨标准帧, 轨道号从 20 770 至 45 133。每个标准帧平均包含 23 景数

据。所有数据均为降轨数据, VV 极化。5 个轨迹数据覆盖华北平原近 20 万  $\text{km}^2$ , 覆盖区域见图 1, 干涉参数如表 1 所示。

表 1 显示, 22 个重轨数据大部分的垂直基线在 500 m 左右, 多谱勒质心频率在 250 Hz 上下, 除 447 轨迹外, 其余 4 个干涉带的时间跨度均为 5 a, 22 个重轨干涉数据保持了良好的干涉性, 较为完整地揭示了华北平原地表沉降空间分布的全貌。

## 1.3 数据处理

经过 PS 识别、PS 沉降速度场时间和空间参考基准的统一处理后, 获得了华北平原地表沉降速度场信息。在近 20 万  $\text{km}^2$  的范围内, 共识别出 2 029 508 个 PS 目标, 每  $\text{km}^2$  范围内包含约 10 个 PS, 这个密度足以全面揭示整个研究区地表沉降变化的空间分布特征(见图 1)。

为了评估 PS 方法反演的速度场的可靠性, 本文分析了天津地区同期地面沉降水准观测资料。天津地区的一等水准测量在每年的 10~12 月进行, 水准网总里程约 3 000 km。平差计算时, 以位于蓟县的基岩点为参考基准, 按分期平差对每期资料进行了平差计算, 共获得 290 个 2006~2010 年具有连续观测成果的沉降观测点。为了比较 PS 方法反演结果与水准观测结果, 假设每个水准点周围 200 m 范围内地表形变梯度是一致的, 落在该范围内的 PS 目标与水准观测结果具有相同的形变梯度。根据此原则, 在 290 个水准点中筛选出了 85 个满足该条件的水准点, 同时考虑到 ASAR 雷达视线约  $23^\circ$  入射角因素, 对二者表示的同期地表沉降速率进行了比较, 结果见表 2 和图 2。图 2 中, 蓝色符号为水准观测点, AB 为速度场剖面。为了进一步对比分析 PSInSAR 与水准观测结果, 作了一条速度场剖面(图 2 中 AB 连线), 图 3 为其剖面图。

根据表 2 统计, 在 85 个水准点中有 52 个与 PS 结果的误差小于 5 mm, 占总点数的 61%, 最大误差为 9.9 mm。进一步计算可得中误差为 4.53 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。

少数水准点与 PSInSAR 反演结果较差较大, 可能与本文假设在 200 m 范围内两者形变梯度一致有关。由图 3 可以看出, 速度场剖面在经过沉降中心地带天津市时二者的较差明显偏大。

表 2 水准观测结果与 PSInSAR 方法反演结果对比(2006—2010)/mm

Tab. 2 Results Comparison Between PSInSAR and Levelling Measurement from 2006 to 2010/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	-3.6	-3.1	-0.5	30	-32.6	-35.4	2.8	59	-32.9	-31.2	-1.7
2	-11.0	-12.1	1.1	31	-4.1	-12.9	8.8	60	-58.5	-65.5	7.0
3	-7.0	-14.1	7.1	32	-69.8	-66.4	-3.4	61	-71.8	-81.4	9.6
4	-2.9	-12.8	9.9	33	-40.4	-33.0	-7.4	62	-42.0	-50.9	8.9
5	-3.4	-3.7	0.3	34	-61.5	-63.5	2.0	63	-42.0	-50.9	8.9
6	-7.8	-8.6	0.8	35	-36.5	-35.4	-1.1	64	-42.7	-39.6	-3.1
7	-8.3	-10.8	2.5	36	-44.0	-49.4	5.4	65	-47.9	-50.7	2.7
8	-8.0	-12.6	4.6	37	-18.6	-24.3	5.7	66	-38.8	-46.2	7.3
9	-10.3	-12.9	2.6	38	-16.4	-25.8	9.3	67	-61.9	-70.1	8.2
10	-12.0	-12.9	1.0	39	-17.6	-20.1	2.5	68	-71.6	-76.1	4.5
11	-11.7	-16.2	4.5	40	-19.0	-19.7	0.7	69	-53.4	-44.4	-9.0
12	-6.8	-2.8	-4.0	41	-13.6	-18.4	4.9	70	-30.3	-39.1	8.8
13	-4.9	-1.1	-3.7	42	-22.0	-28.3	6.4	71	-44.1	-48.2	4.1
14	-8.7	-10.3	1.6	43	-22.4	-27.0	4.6	72	-33.5	-40.3	6.8
15	-11.0	-11.2	0.2	44	-36.3	-40.3	4.0	73	-34.8	-43.9	9.1
16	-11.5	-13.7	2.2	45	-20.7	-25.0	4.3	74	-20.5	-30.0	9.5
17	-10.3	-11.5	1.2	46	-25.5	-32.4	6.9	75	-20.9	-30.0	9.1
18	-10.2	-15.0	4.8	47	-24.3	-30.4	6.1	76	-38.4	-47.3	8.9
19	-36.7	-37.2	0.5	48	-63.6	-67.9	4.2	77	-36.7	-40.8	4.1
20	-27.1	-23.1	-4.0	49	-11.9	-15.4	3.6	78	-13.0	-22.8	9.9
21	-15.7	-16.9	1.2	50	-20.5	-16.9	-3.5	79	-14.7	-21.9	7.2
22	-51.6	-51.3	-0.2	51	-29.1	-31.2	2.1	80	-33.2	-41.7	8.5
23	-58.0	-60.0	2.1	52	-41.9	-49.2	7.3	81	-34.3	-41.8	7.5
24	-61.6	-60.7	-0.9	53	-32.9	-41.6	8.7	82	-30.4	-38.3	7.9
25	-49.7	-51.8	2.1	54	-31.6	-41.4	9.8	83	-29.1	-26.0	-3.1
26	-14.8	-14.7	-0.1	55	-79.8	-82.3	2.5	84	-16.3	-25.6	9.3
27	-16.3	-12.7	-3.6	56	-87.1	-83.5	-3.6	85	-59.3	-69.2	9.8
28	-17.9	-17.0	-0.9	57	-22.5	-17.8	-4.7				
29	-28.9	-27.1	-1.7	58	-17.4	-20.3	2.9				

## 2 华北平原地表沉降分析

由 2006~2010 年研究区平均沉降速率图(见图 1)可以看出,华北平原地表沉降主要分布在北京的东部,天津的市区、静海和滨海新区,河北的廊坊、任丘、沧州、泊头、衡水、南宫和邯郸,山东的德州等老沉降区域。从任丘、沧州经泊头到衡水、德州再经南宫到邯郸,整个区域已形成一条沉降带(见图 1(b))。

在这条沉降带上,尤以天津地区的地表沉降最为突出。天津地区地表沉降大致经历了 1923~1958 年地表平均沉降速率为 10~20 mm/a 的初级阶段、1959~1985 年最高沉降速率超过 100 mm/a 的发展阶段和 1986 以后的治理阶段,至 2004 年,天津的地表平均沉降速率为 10~15 mm/a。2006~2010 年 InSAR 结果(见图 2)显示,天津地区地表主沉降区集中在津南区-滨海区一带,两地中心沉降区雷达视线向平均沉降速率分别为 62 mm/a 和 67 mm/a,这可能与近年天津

工业重心向津南和滨海转移导致地下水需求扩大有关。天津地区同期水准测量结果显示的地表沉降速率在空间分布上与 PS 方法结果非常一致(见图 3),表明 PSInSAR 方法反演的大时空尺度地表沉降信息是可靠的。

北京东部沉降区形成于上世纪 60 年代后期至 70 年代初期,70 年代中期为快速发展期,主要由地下水的过度开采形成,到 2000 年,最大沉降量达 850 mm,年平均沉降速率约为 24 mm/a。PSInSAR 结果显示,该区 2006-2010 年沉降量为 180 mm,雷达视线向年平均沉降速率为 36 mm/a,表明北京东部地区地表沉降趋于加速发展态势。

PSInSAR 结果(图 1(b))表明,沿河北省的沧州、泊头、衡水、南宫到邯郸和石家庄以东、保定以南地区以及山东省的德州地区,地表沉降均处于较高发展态势,其中,沧州、泊头-衡水-德州、邯郸等老沉降区的雷达视线向年平均沉降速率分别为 34 mm/a、37 mm/a、29 mm/a,石家庄以东地区年平均沉降速率为 26 mm/a。

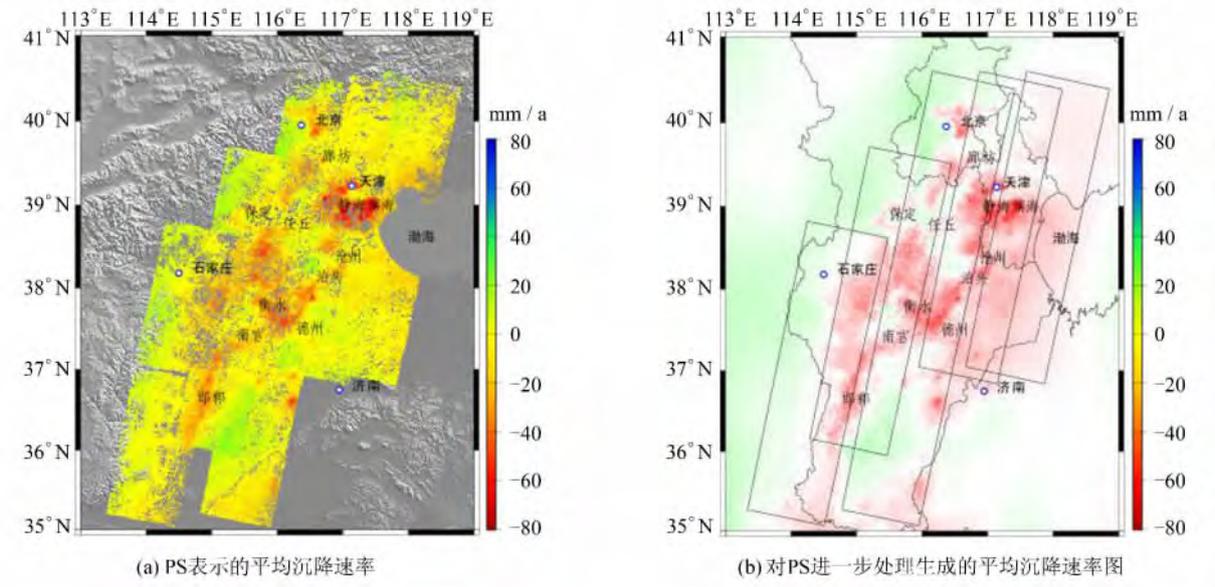


图1 华北平原 2006~2010 年地表平均沉降速率

Fig. 1 Average Subsidence Rate of North China Plain from 2006 to 2010

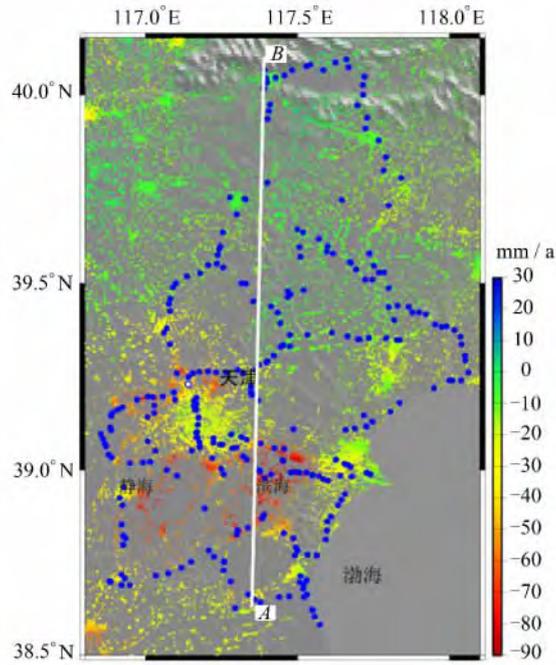


图2 天津地区 PSInSAR 和同期水准测量结果表示的地表沉降速率空间分布图

Fig. 2 Spatial Distribution of Surface Subsidence Rate from PSInSAR and Leveling Results in Tianjin Region During 2006-2010

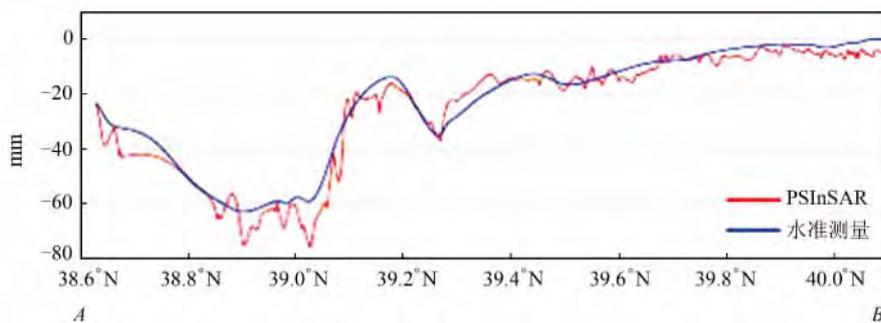


图3 速度场剖面

Fig. 3 Velocity Field Profile

### 3 结 语

本文通过时间基准和空间基准的连接处理对常规的 PSInSAR 方法进行了扩展,处理了覆盖华北平原近 20 万 km<sup>2</sup> 的 500 余景不同帧重轨 ASAR 数据。在不依赖任何地表人工目标的情况下,识别了研究区 PS 目标并提取了地表沉降信息,获取了研究区 2006~2010 年连续的地表沉降速率,其结果与同期精密水准测量结果具有一致性,说明本文提出的数据处理策略在探测大时空尺度地表形变方面不仅是可靠的,还是一种有效的技术手段。

PSInSAR 技术在探测地表形变方面具有良好的应用前景,其优点表现在 PS 密度大、空间分辨率高,能够覆盖长时间、大空间尺度范围,这对于依赖离散而稀疏的人工布设目标的观测方法,如 GPS 观测、水准测量等,是一项有效的补充。

利用 SAR 存档数据,可以获得研究区地表形变历史信息,从而研究区域地表形变在时间和空间上的发展过程及其在不同阶段表现出的不同特征,为制定区域地表沉降防控措施、制定地方经济发展规划服务。

### 参 考 文 献

- [1] Yang G H, Jiang Z S, Liu G Y, et al. Possible Relation of Horizontal Movement Field in North China to Kunlun Mountain Ms 8.1 Earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(2): 10-15 (杨国华,江在森,刘广余,等.华北地区的水平运动场与昆仑山 8.1 级地震的可能关系[J].大地测量与地球动力学,2007,27(2):10-15)
- [2] Zhang Y G, Shuai P, Hu X K, et al. Study on Evolution of Deformation Field in North China Area with GPS Data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, 26(1): 36-41 (张跃刚,帅平,胡新康,等.从 GPS 观测看华北地区的形变场演化[J].大地测量与地球动力学,2006,26(1):36-41)
- [3] Sousa J J, Ruiz A M. PS-InSAR Processing Methodologies in the Detection of Field Surface Deformation Study of the Granada Basin (Central Betic Cordilleras, Southern Spain) [J]. *Journal of Geodynamics*, 2010, 49: 181-189
- [4] Chang C P, Yen J Y, Hooper A, et al. Monitoring of Surface Deformation in Northern Taiwan Using DInSAR and PSInSAR Techniques[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2010, 21(3): 447-461
- [5] Arikan M, Hooper A, Hanssen R. Radar Time Series Analysis over West Anatolia [J]. *European Space Agency*, 2010(S): 677-688
- [6] Wu H A, Zhang Y H, Chen X Y, et al. Ground Deformation Monitoring Using Small Baseline DInSAR Technique: A Case Study in Taiyuan City from 2003 to 2009 [J]. *Chinese J Geophys*, 2011, 54(3): 673-680 (吴宏安,张永红,陈晓勇,等.基于小基线 DInSAR 技术监测太原市 2003-2009 年地表形变场 [J].地球物理学报,2011,54(3): 673-680)
- [7] 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]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, doi:10.1029/2004GL021737
- [8] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis with Application to Volca'n Alcedo, Gala'pagos [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112, doi:10.1029/2006JB004763
- [9] Decriem J, Arnadóttir T, Hooper A, et al. The 2008 May 29 Earthquake Doublet in SW Iceland [J]. *Geophys J Int*, 2010, 181: 1128-1146
- [10] Luo Sanming, Yang Guohua, Li Tao, et al. Analysis of Deformation Process of the L'Aquila Earthquake Detected by PSInSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 602-605 (罗三明,杨国华,李陶,等. PSInSAR 方法探测意大利拉奎拉地震形变过程分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37(5):602-605)
- [11] Luo S M, Du K F, Chang L, et al. Ground Subsidence Rates of Beijing Area Constrained by PS-InSAR Analysis [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(1): 43-46 (罗三明,杜凯夫,畅柳,等.基于 PS-InSAR 方法反演北京地区地表沉降速率 [J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(1): 43-46)
- [12] Guo B Y, He M, Liu J D. Monitoring the Ground Subsidence in Nantong City with the Psinsar Technology [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2011, 22(4): 103-107 (郭炳跃,何敏,刘建东.利用 PS-InSAR 技术监测南通市地面沉降 [J]. 地质灾害与环境,2011, 22(4): 103-107)
- [13] Luo Sanming, Bo Wanju, Huang Quhong, et al. A Method of Generalized Inverse Adjustment Based on Improved Gram-Schmidt Orthogonalization [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2): 174-177 (罗三明,薄万举,黄曲红,等.修正的 Gram-Schmidt 正交化广义逆平差方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37

- (2):174-177)
- [14] Shi J S, Wang Z, Zhang Z J, et al. Assessment of Over-exploitation of Deep Groundwater in the North China Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 215-220(石建省,王昭,张兆吉,等. 华北平原深层地下水超采程度计算与分析[J]. 地学前缘, 2010,17(6): 215-220)
- [15] Yang B, Zhan W, Gao Y L, et al. Some Attempt about Distilling Information of Vertical Deformation Field from GNSS Data[J]. *North China Earthquake Sciences*, 2012, 30(1):1-5 (杨博,占伟,高艳龙,等. GNSS垂向形变场信息提取的尝试[J]. 华北地震科学, 2012,30(1):1-5)

## Ground Subsidence Rate Inversion of Large Temporal and Spatial Scales Based on Extended PSInSAR Method

LUO Sanming<sup>1</sup> DU Kaifu<sup>1</sup> WAN Wenni<sup>1</sup> FU Liming<sup>1</sup> LI Yongkun<sup>1</sup> LIANG Fuxun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> First Crust Deformation Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

**Abstract:** Estimation of processes for slow change in small scale surfaces is one of the main advantages of PSInSAR technology. We present a mathematical framework for the datum connection for time-space referencing, applying it to 500 scenes composed of Envisat ASAR images covering about 200 000 km<sup>2</sup> of the North China Plain, obtained the rate of ground subsidence in the study area during the period of 2006-2010. The experimental results show that: (1) the multiple subsidence centers in North China Plain were still in an evolving state, connecting Beijing, Langfang, Tianjin, Renqiu, Cangzhou, Botou, Hengshui, Dezhou, Nangong and Handan into a continuous area. (2) The most prominent ground subsidence was in Tianjin's Jinghai and Binhai areas having average subsidence rates of 62mm/a and 67mm/a along the line of sight, respectively. The subsidence of the old centers, to the east of Beijing, Cangzhou, Botou -Hengshui -Dezhou, Handan, had rates of 36mm/a, 34mm/a, 37mm/a, 29mm/a, respectively. (3) The experimental results were validated with leveling data in Tianjin area. The difference between the two methods is less than 10 mm, which shows that the results obtained by the PSInSAR technique are consistent with those obtained by leveling. (4) The results here presented can be used as development prevention reference measures of regional ground subsidence.

**Key words:** North China Plain; time and space datum; ground surface slow changes; PSInSAR; surface subsidence rate

**First author:** LUO Sanming, senior engineer, specializes in geodesy data analysis, DInSAR method and application. E-mail: luosanming@yahoo.com

**Foundation support:** The Seism Science & Technology Spark Program of China Earthquake Administration, No. XH13036; Director Foundation of the Institute of Seismology, China Earthquake Administration, No. IS201266111.