

汶川 M_s 8.0 地震 InSAR 形变观测及初步分析

孙建宝¹⁾ 梁 芳²⁾ 沈正康¹⁾ 徐锡伟¹⁾

1) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2) 北京市地震局, 北京 100081

摘 要 2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 地震发生后, 通过干涉雷达方法 (InSAR) 获得了覆盖整个灾区全面的高精度形变观测资料 (约 $500\text{km} \times 350\text{km}$), 为研究该地震的发生机理提供了重要的观测依据。通过分析 InSAR 成像几何和 ALOS PALSAR 数据的特点, 初步获得了对汶川地震的定性认识, 为相关研究提供参考, 也为进一步深入定量反演奠定基础。此次地震中 InSAR 卫星观测的应用, 显示了卫星大地测量手段对于地震科学研究的重要意义。

关键词 汶川 M_s 8.0 地震 同震形变 干涉雷达

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2008)03-0789-07

0 引言

2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 地震的发生是继 1976 年唐山大地震后发生在人口稠密地区的一次重大地震事件, 对四川灾区造成了难以弥补的损失。震后全球的科学家动用各种手段对此次地震进行了快速分析, 各种资料和各个研究组的研究成果相继在学术期刊和 Internet 上公布 (张培震等, 2008; Burchfiel *et al.*, 2008), 相信关于此次地震的讨论将持续相当长的一段时间。本文利用干涉雷达技术 (InSAR) 获得了本次地震的全面地壳形变场, 为深刻理解此次地震的形变过程和发生机理, 以及未来地震灾害的演化趋势提供了重要的观测资料。截止目前, InSAR 提供的形变观测数据是理解此次地震极为重要的资源, 因为 InSAR 能够给出约 $500\text{km} \times 350\text{km}$ 范围内的地壳形变场, 这样的覆盖对于了解如此规模的地震是十分必要的。特别是断层上盘的形变场, 由于采用了长波雷达数据, 获得了足够信噪比的形变观测结果, 这在以往用 C 波段雷达数据是根本不可能实现的。在龙门山地区这样比较特殊的地形地貌地区, 对于矩震级接近 8 级的内陆逆冲兼走滑地震, 能够观测到完整的连续形变场, 对于 InSAR 技术来说已经是巨大的成功, 也是 InSAR 应用历史上的第 1 次。

关于汶川地震的其它方面的数据源, 无论是地震波形数据 (纪晨, 2008, 私人通讯), GPS 数据 (沈正康等, 2008, 私人通讯), 余震分布 (朱艾斓, 2008), 还是野外调查 (徐锡伟等, 2008) 都很难约束发震断层的几何特征, 后者是理解一次地震最基本的信息。InSAR 形变场的全面覆盖有望提供详细的断层几何参数和滑动参数, 多种数据源的联合反演可能会提供更加准确的断层破

〔收稿日期〕 2008-08-07 收稿, 2008-08-22 改回。

〔基金项目〕 中国地震局汶川 8 级地震应急科学考察项目资助。

裂信息。

相对于 1976 年唐山地震,InSAR 和 GPS 形变观测技术的出现可能是近 30 多年来极为重要的进展之一,如何充分利用 InSAR 形变观测资料是需要深入研究的问题。本文的目的在于为广大科研人员提供直观的形变观测图件,以便高效地利用有限的资源开展地震研究。

1 干涉雷达(InSAR)观测方法

InSAR 形变观测结果不能像 GPS 观测一样直接利用,这与 InSAR 的成像特点有关。InSAR 观测到的相位变化是地面各个方向形变在雷达视线向 LOS 方向的投影,不同方向的形变贡献大小不同,称为干涉雷达的 LOS 向模糊问题(图 1)。不同轨道雷达干涉中地面 3 方向形变对 LOS 向形变的贡献可以近似用下面的 2 个公式表示(以 ERS 卫星,或者 ENVISAT 卫星的 IS2 模式为例):

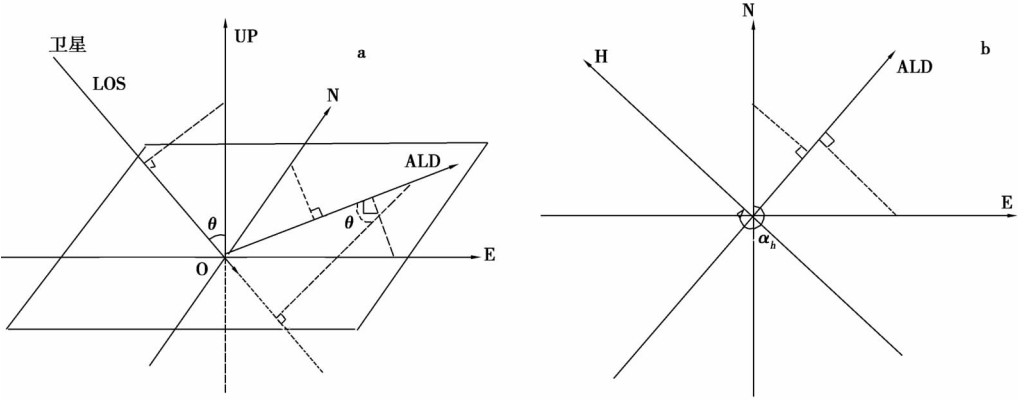


图 1 a 干涉雷达 3 维成像几何(升轨),b 干涉雷达水平投影(升轨)

Fig. 1 (a) 3D imaging geometry of SAR interferometry(ascending pass),
(b) Horizontal projection of SAR interferometry(ascending pass).

H 为卫星飞行方向;ALD 为卫星观测方向

升轨情况下有:

$$d_{LOS} = [d_{up}, d_n, d_e][0.93169, -0.08494, -0.35318]^T \tag{1}$$

降轨情况下有:

$$d_{LOS} = [d_{up}, d_n, d_e][0.91566, -0.09397, 0.39080]^T \tag{2}$$

上式中, d_{LOS} 为雷达视线向位移, d_{up} 为垂直位移, d_n 为北向位移, d_e 为东向位移。可以看出,InSAR 对于垂向形变的敏感性最高,对于 SN 向形变的敏感性最低。随着雷达波的入射角度不同,观测卫星的不同,这些参数会有一些变化,但是各个方向的相对敏感性保持不变。

2 InSAR 数据源和 InSAR 数据处理

汶川地震发生在青藏高原的东边界,断层上下盘之间的地形起伏非常剧烈。在山区(上盘)由于雷达图像叠掩、前缩、阴影,以及致密的植被覆盖等因素的影响,雷达回波中噪声加大,5.6cm 的 C 波段雷达系统几乎得不到任何有意义的干涉信息;而波长较长的 L 波段(23.6cm)

雷达系统,以及 38° 入射角的雷达波能够在很大程度上克服这些问题,使得 2 次成像中雷达后向散射保持很好的相关性,大大提高了干涉信号的相干性和干涉相位的信噪比。

InSAR 技术的成功应用取决于一些客观因素,并不是每个地震都能够得到足够信噪比的干涉数据,其中数据源是一个主要的问题。通过分析目前一些重要的干涉数据源,我们可以对目前的应用状况有初步的了解。InSAR 数据的处理技术也是影响形变观测精度的重要因素,本文不做进一步分析。

本次地震发生后,日本宇航局(JAXA)为本次地震启动了危机响应观测任务,获得了一批高质量的观测结果。欧洲空间局(ESA)也为本次地震应急响应安排了观测任务,获得了断层下盘的高质量形变观测。另外,新近发射成功的意大利 COSMO-SkyMed 干涉卫星,积极为本次地震拍摄了高分辨率观测结果,同时也安排了尝试性干涉观测,意大利罗马的 INGV 研究所最终获得了一小块干涉数据。中国目前尚不具备卫星雷达干涉观测能力,所有这些资源都要依赖国外支持。但是中国具备机载雷达观测能力,可以提供灾后应急所需的高分辨观测数据(非干涉),精度也远高于卫星平台。对于同震形变研究,余震预测和中长期灾害演化等重要应用领域,需要具有干涉能力的卫星数据,它对于灾害应急、地震发生机理研究和震后应力调整过程研究等都有重要意义。

本研究我们主要利用 JAXA 的 ALOS PALSAR 数据(L 波段)和 ESA 的 ASAR 数据(C 波段)获取本次地震的形变场。ALOS 卫星 2006 年发射成功,获得了南美、北美和日本的几个较小地震的干涉形变场。汶川地震这样巨大的事件,对于 ALOS 卫星,甚至所有其它类型的卫星都是第 1 次,因此干涉形变场的获取也是对这些卫星系统的一次检验。ALOS PALSAR 数据在此次地震中安排了完整的形变覆盖观测,获得了包括断层上盘在内的完整形变场。本研究中利用 2 路差分干涉方法,使用 SRTM DEM 数据消除地形相位,获得了升轨条件下的 LOS 向缠绕形变场(每条纹 11.8cm)。ALOS 卫星没有获得降轨条件下的形变数据(FBD 和 FBS 模式),这与该卫星的系统设置有关系。

3 汶川地震 InSAR 同震形变场及其初步分析

本研究所采用的 PALSAR 数据全部为升轨方向,而且成像时间都在 2008 年以后。除了 2 条轨道的震前数据采用 FBD 双极化模式数据外,其它均为单极化 FBS 数据。雷达的入射角均为 34.3° ,相应的代表性单位矢量约为:

$$d_{\text{LOS}} = [d_{\text{up}}, d_{\text{n}}, d_{\text{e}}] [0.756, -0.143, -0.639]^T \quad (3)$$

可以看出,垂直形变与 EW 向形变的敏感度相差不大,但两者对 LOS 向的贡献为相反方向。根据公式(3),对于汶川 $M_s 8.0$ 地震,逆冲运动与右旋走滑运动在 InSAR 图像上表现为 2 种相反的贡献,粗略地说,最终的 LOS 形变方向和符号取决于两者贡献较大的一个,这也是本次地震中 InSAR 不能给出确切的最大位错的主要原因。如果野外调查获得了地表水平和垂直位错量,通过公式(3),再结合断层的走向和雷达成像几何关系,可以计算出实际的 LOS 向位错量,从而实现野外观测与 InSAR 的互相检验和比较。这一点有别于 1997 年的玛尼 $M_w 7.5$ 地震和 2001 年的昆仑山 8.1 级地震,因为东昆仑断裂是一条走滑为主的断裂,形变方式远没有汶川地震复杂。

图 2 给出的形变图像是缠绕在一个相位周期($-\pi \sim \pi$ 弧度)内的 InSAR 观测,也是最原始

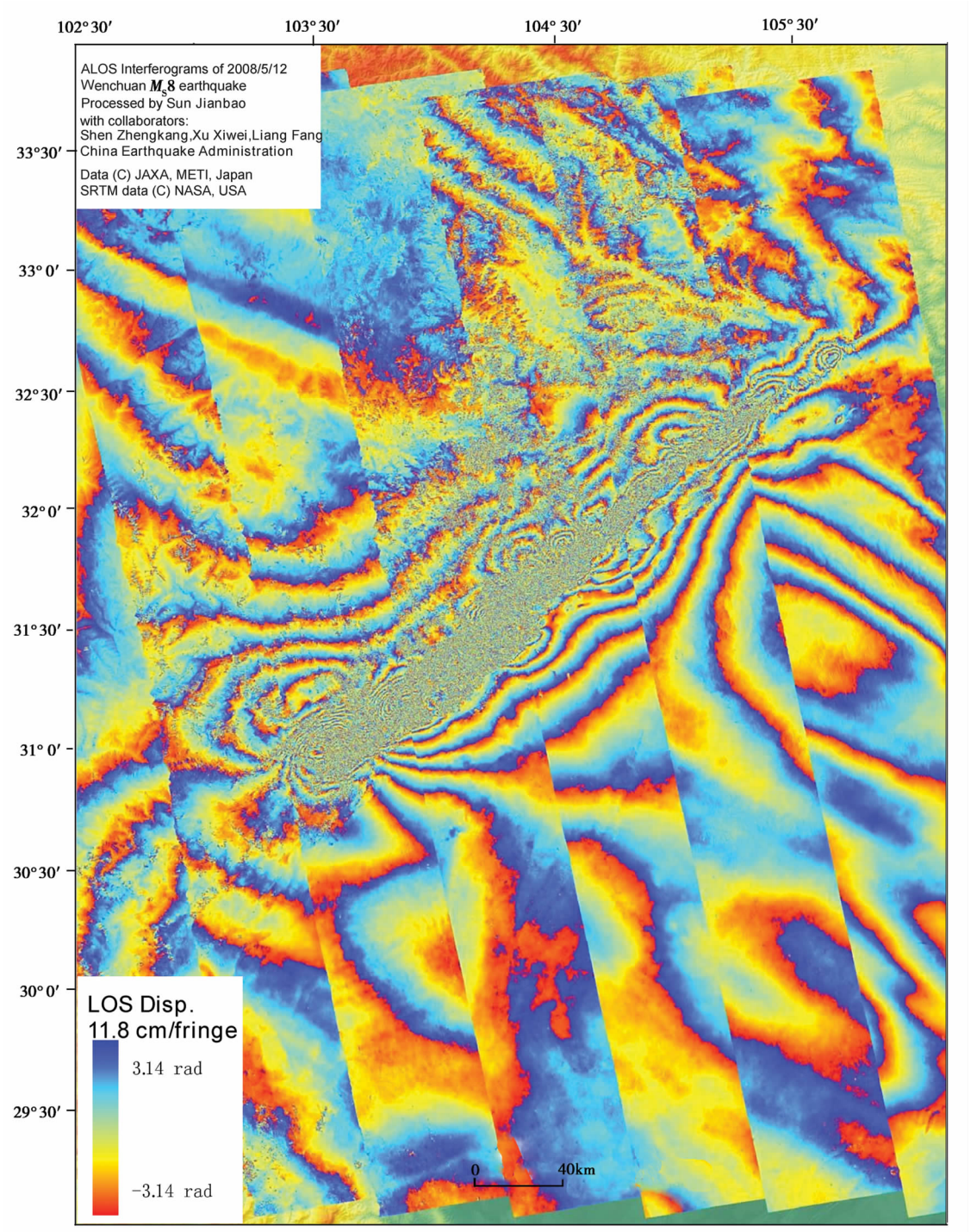


图 2 汶川 $M_{8.0}$ 地震缠绕的 InSAR 同震形变场

Fig. 2 Wrapped InSAR phase of the $M_{8.0}$ Wenchuan earthquake co-seismic deformation field.

的雷达数据处理结果,可以客观反映 InSAR 形变观测全貌。由于数据处理技术方面的差异,数据后期校正技术的不同,不同人给出的处理结果可能有所不同,但图像基本特征应该保持不变。这里给出的是缠绕的干涉图像,一些误差因素尚未消除,只能用于定性分析。

PALSAR 数据波长为 23.6cm,每个条纹代表 11.8cm 的 LOS 向形变。为了清楚表达形变信息,图 2 中省略了所有与形变无关的辅助信息。从图 2 中可以直观得到关于本次地震及其所造成地表破坏的一些基本信息。首先,图中央有一条几乎完全被噪声掩盖的 NE 走向条带,该条带 SW 段较宽,而 NE 段明显变窄。条带的边缘可以看到一些非常密集的干涉条纹,特别是在 SW 端点附近。该噪声条带是 InSAR 图像上的时间去相干区域。在雷达 2 次成像期间,相邻 2 个像元的相位变化超过 π 弧度,雷达后向散射机制发生剧烈变化,2 次成像的回波信号不具有相关性,反映到雷达干涉相位上为纯噪声。对于形变观测来说,这一部分重要信息几乎全部丢失。另一方面,该条带也说明地震所造成的破坏在哪些区域分布较大。如果没有滑坡等次生灾害的影响,那么这个条带也反映了地表的破坏带宽度,它与地震破裂带宽度有一定的一致性。类比 1997 年的玛尼 $M_w 7.5$ 地震(孙建宝等,2007),我们观测到的是一条去相干曲线,而不是一个条带,因为玛尼地震地表破裂发生在很窄的区域内。该现象也反映了地震断层的倾角大小。玛尼地震断层为一条近垂直的走滑断层,而本次地震的发震断层是一条缓倾的逆冲兼走滑断层。根据该条带的分布可以初步推断,汶川地震断层的倾角在 NE 和 SW 段存在显著变化,而且断层活动的机制也有相应的变化。其次,本研究处理并获得了跨越断裂南北约 500km 范围的形变场,但图 2 反映的并不完全是地壳形变信息,还包括 InSAR 的地形误差、轨道误差、大气延迟误差和电离层干扰误差等。通过分析各条轨道干涉数据之间的相关性,可以初步断定 InSAR 形变限于紧靠断层的较窄区域内,也就是环绕上述去相干条带的干涉条纹区域,垂直断层最大长度 < 130km,最小约 40km(青川附近);更远的区域,各条轨道的干涉形变大小和方向差异较大,因此不可能是与地震相关的构造活动的结果。因此可以看出,即使是一个如此大规模的地震(逆冲兼走滑),其所造成的永久形变的范围也是有限的,如果在抗震设防中避开具有发震能力的断层,就有可能避免在地震中遭受重大损失。再次,关于同震形变的方向,断层下盘具有 LOS 向拉长运动,这是下盘下降运动的反映,同时下盘也向 SW 方向运动,造成 LOS 向缩短,另外,断层两盘还具有相向运动,几种运动的综合作用构成了 LOS 向形变场。图 2 中断层上盘干涉条纹方向在靠近断层的地方与远离断层的区域发生了翻转,特别是断层南端,据此可以推测远离断层区域上盘发生了右旋运动或者是下降运动。后者似乎难于理解,但是通过弹性形变模拟发现,这种现象是有可能存在的,而且 GPS 数据也反映了相似的运动特征。由于右旋作用的影响,图 2 不能给出它的确切分布范围和量值,需要进一步的反演分析。最后,关于成都平原内断层的活动情况,从 InSAR 的图像上我们没有发现成都平原内任何一条断层发生任何方式的活动。Parsons 等(2008)在他们的文章中计算得出,成都平原内的断层大部分处于应力下降状态(如他们文中 c、g 和 k 断层),而只有 j 断层的一部分处在应力增大状态,但是量值较小。因此初步来看,成都平原内的断层在汶川地震之后并不值得过多的关注。

4 结论

通过 InSAR 形变观测,我们获得了汶川地震全面的同震地壳形变图像,对于了解该地震的发震机理具有重要意义。虽然距离得出断层破裂模型还有较长的路要走,但是从原始的干涉形

变图像上我们已经可以得出一些重要的地质和地球物理信息,这些信息对于深入研究汶川地震以及震后重建都具有重要意义。下一步需要研究 InSAR 同震形变的反演,InSAR 形变与 GPS 形变联合反演,以及同震和震后应力应变场演化等更为重要的科学问题。

致谢 本文研究中与周本刚、王敏、甘卫军研究员,朱艾斓、陶玮、张进博士进行了有益的讨论;此次灾难发生后日本宇航局 Kawai Makoto 先生为本研究做出积极努力,在第一时间满足我们在数据方面的所有需求;日本 Kyoto 大学 Yo Fukushima 博士在地震发生后与我们积极合作和广泛讨论;欧洲空间局 Rita Malosti 女士对本研究积极支持和帮助,在此一并致谢。本研究所有 PALSAR 数据版权归日本 JAXA,METI 所有,ASAR 数据版权归欧洲空间局所有。

参 考 文 献

- 孙建宝,徐锡伟,沈正康,等. 2007. 基于线弹性位错模型及干涉雷达成同震形变场反演 1997 年玛尼 $M_w 7.5$ 级地震参数 - I: 均匀滑动反演 [J]. 地球物理学报, 50(4): 1097—1110.
- SUN Jian-bao, XU Xi-wei, SHEN Zheng-kang, *et al.* 2007. Parameter inversion of the 1997 Mani earthquake from InSAR co-seismic deformation field based on linear elastic dislocation model - I: Uniform slip inversion [J]. Chinese J Geophys, 50(4): 1097—1110 (in Chinese).
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等. 2008. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造 [J]. 地震地质, 30(3): 597—629.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, *et al.* 2008. The $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure [J]. Seismology and Geology, 30(3): 597—629 (in Chinese).
- 张培震,徐锡伟,闻学泽,等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因 [J]. 地球物理学报, 51(4): 1066—1073.
- ZHANG Pei-zhen, XU Xi-wei, WEN Xue-ze, *et al.* 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China [J]. Chinese J Geophys, 51(4): 1066—1073 (in Chinese).
- 朱艾斓,徐锡伟,刁桂苓,等. 2008. 汶川 $M_s 8.0$ 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析 [J]. 地震地质, 30(3): 759—767.
- ZHU Ai-lan, XU Xi-wei, DIAO Gui-ling, *et al.* 2008. Relocation of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake sequence in part: preliminary seismotectonic analysis [J]. Seismology and Geology, 30(3): 759—767 (in Chinese).
- Burchfiel B C, Royden L H, Van der Hilst R D, *et al.* 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China [J]. G S A Today, v. 18, no. 7, doi: 10.1130/GSATG18A.1.
- Parsons Tom, Chen Ji and Eric Kirby. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan Basin [J]. Nature, doi: 10.1038/nature07177.

INSAR DEFORMATION OBSERVATION AND PRELIMINARY ANALYSIS OF THE $M_s 8$ WENCHUAN EARTHQUAKE

SUN Jian-bao¹⁾ LIANG Fang²⁾ SHEN Zheng-kang¹⁾ XU Xi-wei¹⁾

1) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

2) *Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100081, China*

Abstract

After the May 12, 2008 $M_s 8$ Wenchuan earthquake, we extract the high-precision deformation data covering the whole quake-stricken area ($\sim 500\text{km} \times 350\text{km}$) by using SAR Interferometry approach (InSAR), which provides important information for the earthquake mechanism research. By analyzing InSAR imaging geometry and the characteristics of ALOS PALSAR data, we get some qualitative knowledge of the Wenchuan earthquake. This work provides helpful information for the related research and a basis for the following quantitative inversion of the earthquake rupture. The InSAR application of this earthquake shows the scientific significance of satellite geodesy to earthquake research.

Key words $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake, co-seismic deformation, SAR Interferometry

〔作者简介〕 孙建宝,男,1975年生,博士,主要研究 InSAR 技术在地壳形变场中的应用,以及 InSAR 和 GPS 形变场的联合反演问题等,010-62009006, E-mail: Sunjianbao@gmail.com。