

## 利用 InSAR 技术监测矿区地表形变

朱建军, 邢学敏, 胡 俊, 李志伟

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 介绍了 InSAR 技术在矿区地表形变监测中的应用现状及进展, 分析了 D-InSAR 技术相比于传统测量手段的优势, 并指出其在矿区地表形变监测中的不足。针对传统 D-InSAR 技术的局限性, 重点讨论了短基线(SBAS)、永久散射体(PS)和角反射器(CR)等高级差分干涉技术, 并结合矿区沉降监测实例, 分析了其特点与应用现状, 讨论了现有研究中仍存在的问题。高级 InSAR 技术和高分辨率 SAR 影像的结合将是矿区地表形变监测的发展趋势。

**关键词:** InSAR 技术; D-InSAR 技术; 矿区; 地表形变监测; 短基线; 永久散射体; 角反射器

**中图分类号:** P227

**文献标志码:** A

## Monitoring of ground surface deformation in mining area with InSAR technique

ZHU Jian-jun, XING Xue-min, HU Jun, LI Zhi-wei

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The application status and research progress of InSAR technique in the monitoring of the ground surface deformation in mining area were introduced. Firstly, the advantages of D-InSAR technique were analyzed by comparing to the traditional surveying methods. Then, the limitations of D-InSAR in the mining deformation detection were described. According to the limitations of the traditional D-InSAR method, the advanced InSAR technique, e.g., small baseline subset (SBAS), permanent scatterer (PS) and corner reflector (CR) techniques were discussed. Using real mining subsidence monitoring as example, the characteristics and application status of those advanced InSAR techniques were studied, and the key problems still existing in the current research were summarized. Finally, it is indicated that the development trend of InSAR monitoring surface deformation in mining area is the combination of advanced InSAR and high-resolution SAR images.

**Key words:** InSAR technique; D-InSAR technique; mining area; surface deformation monitoring; small baseline subset; permanent scatterer; corner reflector

矿产资源的过度开采容易破坏矿区地下地质结构, 进而引发地表塌陷、滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝、地面沉降和地面积水等事故。如果开采不慎, 极易触及地下含水层, 严重者甚至导致矿区透水事故, 造成严重的安全隐患甚至人员伤亡。通过对矿区长期、动态的沉降监测, 对矿区沉降规律进行分析, 可及时掌握矿区地质环境的破坏程度, 从而针对

实际情况制定相应应急处理方案。同时, 矿区沉降监测获取到的地表形变数据信息可为矿区的规划、治理和发展提供数据支撑, 有利于促进矿山地质灾害环境的一体化管理。因此, 矿区沉降监测是矿区开采和可持续发展的重要组成部分, 矿区沉降监测对预防潜在地质灾害具有重要意义。

目前, 针对矿区地表形变监测的主要手段有传统

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40974006, 40901172); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NECT-08-0570); 中央高校基本科研业务费专项资助(2011JQ001, 2009QZZD004); 湖南省国土资源厅矿产资源保护与合理开发利用科研项目; 湖南省高校创新平台开放基金项目(09K005, 09K006)

**收稿日期:** 2011-05-12; **修订日期:** 2011-07-18

**通信作者:** 朱建军, 教授, 博士; 电话: 0731-88836931; E-mail: zjj@csu.edu.cn

的水准测量、GPS测量和电子测距测量等。尽管这几种监测方法的成熟度和高精度毋庸置疑,但它们存在以下不足:1)需要大量的人力、物力的支持,需要测量人员进入监测区域内,加大了监测工作的难度,存在一定的安全隐患;2)监测范围小、空间分辨率低、不适合用于对矿区进行快速、准确、大范围的监测;3)水准和GPS观测的成本较高,台站分布和观测周期受到人力、财力和气候环境等因素的限制,对于采空区大面积长期形变监测显得十分不足<sup>[1]</sup>。

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术是近几年发展起来的一种新型大地测量手段。该技术通过传感器的轨道参数和成像几何关系实现对地表点目标坐标位置,高程及形变的测量,成功地综合了合成孔径雷达成像原理和干涉测量技术,可精确测量地表某一点的三维空间位置及微小变化<sup>[2]</sup>。尤其是在最近十多年,InSAR技术取得了重大突破,已成为雷达遥感领域中引人瞩目的重要分支<sup>[3]</sup>。差分干涉测量(Differential InSAR, D-InSAR)技术作为InSAR技术的一个延伸,主要用于监测雷达视线方向厘米级或更微小的地球表面形变,以揭示许多地球物理现象,如地震形变、火山运动、冰川漂移、地面沉降以及山体滑坡等<sup>[4]</sup>。在矿区地表形变监测中,D-InSAR技术也取得了大量的成功范例,其监测范围大、空间分辨率高、无接触式测量等特点,大大弥补了传统测量手段的不足。但是,D-InSAR技术受到时空失相关和大气延迟的影响,使得其精度和适用性显著降低<sup>[5]</sup>。而近十年以来,随着小基线集(SBAS)、永久散射体(PS)和人工角反射器(CR)等高级InSAR技术的发展,使得矿区地表形变监测的水平得到了进一步的提高。

本文作者首先简要阐述D-InSAR技术的基本原理,介绍其在矿区地表形变监测中的研究现状,同时将指出该技术在矿区地表形变监测中的局限性。随后,通过介绍SBAS、PS和CR等高级InSAR技术的基本原理,结合其在矿区监测中的具体应用实例对其在矿区形变监测中的特点以及不足进行重点分析与探讨。最后,通过分析目前InSAR监测矿区地表沉降应用中存在的主要问题,指出其未来的发展趋势。

## 1 D-InSAR技术监测矿区地表形变

### 1.1 D-InSAR技术

D-InSAR技术是在InSAR技术基础上发展起来的

一种专门应用于探测地表位移变化的手段。其基本原理是利用同一地区的两幅或两幅以上SAR图像组成干涉图,而干涉图中不仅包含因地形起伏引起的干涉相位,还包含了由地表位移而引起的形变相位,通过对干涉图进行差分处理(去除地形影响)来获取地表微量形变。对于一幅干涉图而言,是通过已配准的主辅SAR影像的共轭相乘所得到的<sup>[6]</sup>。

$$IF(r, n) = M(r, n)S(r, n)^* \quad (1)$$

式中:\$(r, n)\$表示像素坐标;\$M\$和\$S\$分别为复数形式的主辅SAR影像;\$IF\$为复数形式的干涉影像,而其相位\$\Delta\varphi\$可以写成以下的形式<sup>[7]</sup>:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}D + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{HB_{\perp}}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda}B_{\parallel} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} + 2k\pi \quad (2)$$

式中:\$\lambda\$表示雷达波长;\$R\$为斜距;\$\theta\$为雷达入射角;\$k\$为整周模糊度;\$B\_{\perp}\$和\$B\_{\parallel}\$分别为干涉对的垂直基线和平行基线;\$\varphi\_{\text{noise}}\$代表相位噪声;\$\varphi\_{\text{atm}}\$为大气相位。

在式(2)中,等号右侧第一项表示形变相位,是指在主辅影像所间隔的时间范围内,地表在雷达视线方向(Line-Of-Sight, LOS)上的位移\$D\$所引起的干涉相位。第二项表示由地表高程\$H\$引起的相位变化,即地形相位。去除地形相位的方法有两种:一种是利用仅包含地形信息的SAR影像对生成干涉图进而得到地形相位;另一种是利用已有的外部DEM模拟地形信息从而实现地形相位的去除。因此差分干涉方法可归结为两种模式:使用外部DEM的二轨方法;使用多图像干涉生成地形影像对的三轨或四轨方法<sup>[8]</sup>。第三项表示平地相位,是由不同像素在参考椭球面的斜距差所引起的。\$B\_{\parallel}\$可通过卫星精密轨道数据求得<sup>[9-10]</sup>;也有一些学者利用地面控制点来优化基线<sup>[11]</sup>。对于重复轨道干涉图而言,大气相位(\$\varphi\_{\text{atm}}\$)是最主要的误差源之一,严重时可以给干涉图带来0.5到1个干涉条纹的影响。

GPS、MODIS或MERIS等水汽资料可用来有效的去除大气效应,但受限于外部条件的制约<sup>[12]</sup>;干涉图堆叠是另一种常用的大气相位去除方法<sup>[13]</sup>。相位噪声(\$\varphi\_{\text{noise}}\$)包括热噪声、时空失相关噪声、多普勒失相关噪声以及数据处理过程产生的噪声等。多视和滤波都可以达到去噪的效果。而滤波方法主要分为频域(如Goldstein滤波<sup>[14-15]</sup>)和空域(如Lee滤波<sup>[16]</sup>)两类。最后一项为\$2\pi\$整数倍的整周模糊相位。这是由于干涉相位图的相位往往是缠绕的,反映的只是真实相位值的小数部分,因此要通过解缠来还原相位的真值。目前常

用的解缠方法有枝切法<sup>[17]</sup>和最小费用流法<sup>[18]</sup>等。

很明显,要通过干涉相位得到准确的地表形变值  $D$ , 首先需要去除地形相位、平地相位、大气相位、噪声以及整周模糊相位。在实际数据处理中,可能仍然会存在一些相位残余,其大小决定了地表形变监测的精度。而相比于传统测量手段, D-InSAR 技术具有以下优势<sup>[19]</sup>: 1) 能够对监测区域进行全天时、全天候观测,测量过程中以面为基础; 2) 能够在短时间内监测到成千上万平方公里的地表变形,是一种无接触式的监测手段,基本上不需要地面控制点,精度高; 3) 能够达到厘米甚至毫米级精度,数据处理的自动化程度高。近二十年来, D-InSAR 技术的发展大大促进了 InSAR 技术由理论研究向实际应用的发展,目前已经在全球各地被广泛应用起来。

## 1.2 D-InSAR 技术监测矿区地表形变

D-InSAR 技术在矿区沉陷引发的地质灾害监测方面的研究始于 1996 年, CARNEC 等用相隔 35 d 的 SAR 影像获取了法国 Gardanne 附近煤矿的地面沉降,发现了一个大范围的沉降变形环区域,沉降漏斗的最大变形达 42 mm<sup>[20]</sup>。2000 年, CARNEC 和 DELACOURT<sup>[21]</sup> 又用相同的方法得到了该煤矿 1992—1995 年的地面沉降变化,与地面沉降的发展和采煤工作面的推进吻合较好,并且和地面的水准观测结果基本保持一致。2003 年, RAUCOULES 等<sup>[22]</sup>用 D-InSAR 技术对法国 Vauvert 地区一个盐矿进行地面沉陷监测,并根据监测结果修改了地面水准观测方案。2004 年, GE 等<sup>[23]</sup>介绍了用 GIS 技术来辅助解释 D-InSAR 技术获取的矿区沉陷,通过 GIS 技术把 D-InSAR 测得的矿区沉陷和采矿工作区叠加起来,使采矿对地面沉陷影响的表达更加清晰。随后,在 2007 年,他们对采用多源 SAR 数据(JERS、ERS、Radarsat-1、ENVISAT ASAR)监测矿区沉陷进行了研究,发现在矿区存在植被的情况下, L 波段的数据受时间失相干影响较小,得到的结果更加稳定<sup>[24]</sup>。

迄今为止,我国学者也已开展了大量用 D-InSAR 技术监测矿区沉降的研究,吴立新等<sup>[25]</sup>、董玉森等<sup>[26]</sup>、刘国林等<sup>[27]</sup>、宁树正等<sup>[28]</sup>以及李晶晶和郭增长<sup>[29]</sup>均就 D-InSAR 技术在矿区开采沉陷监测中的应用进行分析和实验,并成功应用于唐山、开滦、潞安等矿区的地表沉降监测。此外, YANG 等<sup>[30]</sup>和侯建国等<sup>[31]</sup>应用二轨差分干涉技术对陕西神木矿区坍塌情况进行开采沉陷监测分析。这些成功应用的实例都体现了 D-InSAR

技术在矿区地表形变监测中的优势与实力。图 1 所示为利用 D-InSAR 技术反演获取的湖南省冷水江矿区在 2007 年至 2009 年间的沉降结果。从图 1 中可以明显看出,沉降区域主要可划分为 4 个沉降漏斗区。图 2 所示为这 4 个主要沉降区域的沉降等值线图。图 3 所示为冷水江矿区中的重点研究区域宝大兴矿区(见图 1)的沉降等值线结果。这些结果均对冷水江矿区由于矿产资源开采而引起的大幅度沉降的监测工作提供了有利的数据资源<sup>[32]</sup>。

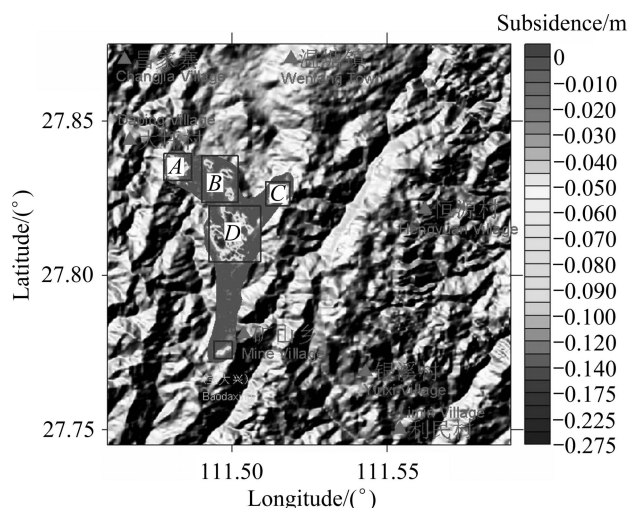


图 1 利用 D-InSAR 技术获得的湖南省冷水江矿区在 2007—2009 年间的沉降结果图<sup>[32]</sup>

Fig.1 Ground subsidence map in Lengshuijiang mining area of Hunan Province from 2007 to 2009 gained by D-InSAR technology<sup>[32]</sup>

## 1.3 D-InSAR 监测矿区沉降的局限性

尽管 D-InSAR 技术在矿区地表形变监测方面取得了很多可喜的成绩,体现了其在地表形变监测中极大的应用潜力,但仍存在一些不足与局限: 1) 重复轨道观测模式中,地物在时间序列上的变化会导致其散射特性的变化,一般当时间基线长于 1 a 时就会大大降低地物在时间上的相干性,导致 D-InSAR 处理出来的差分干涉图效果很差,失去其形变监测的优势<sup>[33]</sup>; 2) 当研究区域内有植被或冰雪覆盖时,其空间上的相干性会大大减弱,而较长的空间基线同样会导致空间失相关现象严重,进而严重影响 D-InSAR 处理的效果; 3) D-InSAR 技术极易受到研究区域内大气延迟相位的影响,会降低获取的形变精度; 4) 矿区开采引起的地面沉降往往速率较快,可能超出 D-InSAR 的形变监测能力范围。综上所述可知,针对矿区这一特殊环境中,由于采矿常常造成地面沉陷、滑坡、崩塌、塌

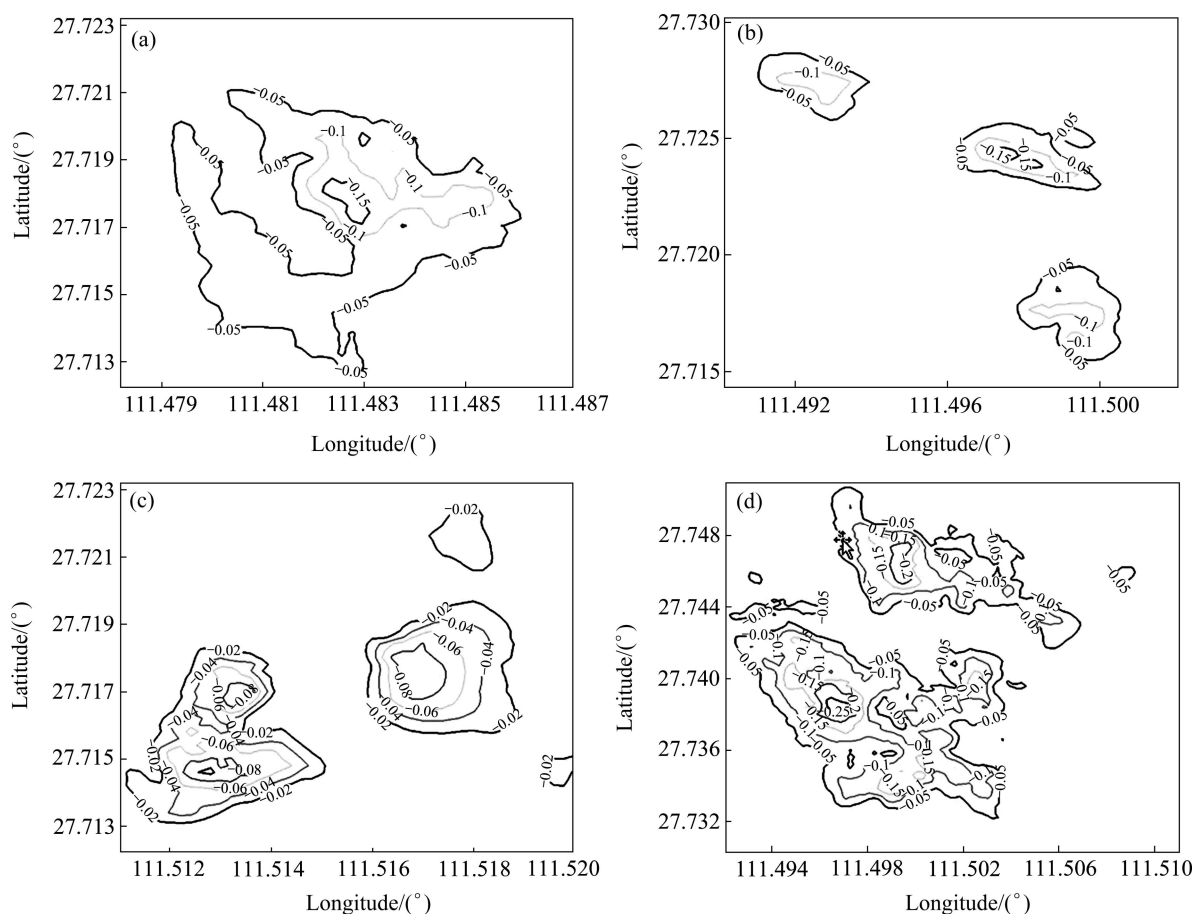


图 2 图 1 中沉降漏斗区 A~D 的等值线图(2007 年 1 月 25 日至 2009 年 1 月 30 日)<sup>[32]</sup>

**Fig.2** Contour maps of subsidence bowls A~D shown in Fig.1 (from Jan. 25, 2007 to Jan. 30, 2009)<sup>[32]</sup>: (a) Bowl A; (b) Bowl B; (c) Bowl C; (d) Bowl D

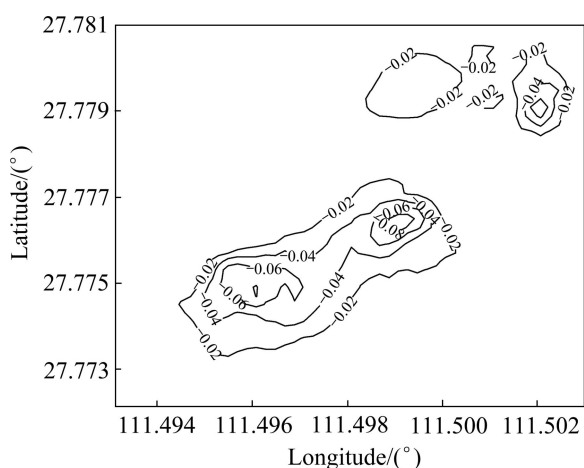


图 3 湖南省宝大兴矿区的沉降等值线图(2007 年 1 月 25 日至 2009 年 1 月 30 日)<sup>[32]</sup>

**Fig.3** Contour map of Baodaxing mining area of Hunan Province (from Jan. 25, 2007 to Jan. 30, 2009)<sup>[32]</sup>

陷、地裂缝、泥石流等地质灾害, 环境非常恶劣, 加上矿区经常有矿石堆积或植被覆盖, 极易造成失相关, 从而可能使得传统的 D-InSAR 技术很难发挥作用。

## 2 高级 InSAR 技术监测矿区地表形变

针对上述 D-InSAR 技术在矿区监测应用中存在的问题, 国内外学者们开始尝试采用多幅时序 SAR 影像对矿区进行时间序列沉降分析。即在具体数据处理中, 放弃了影像中质量差的点, 仅仅保留研究区域内稳定性较好的点目标作为处理对象, 结合多幅 SAR 影像的时间序列分析方法, 以弥补传统 D-InSAR 技术的时空失相干和大气延迟问题, 提高形变监测的精度。目前, 采用多幅 SAR 影像进行时序差分干涉处理的手段主要包括: 小基线集(SBAS)技术, 永久散射体(PS)技术及人工角反射器(CR)技术, 在这里本文作者将这些技术统一称为高级 InSAR 技术。

### 2.1 SBAS 技术监测矿区形变

SBAS 方法是 BERARDINO 等<sup>[34]</sup>在 2002 年提出的利用多幅干涉 SAR 图像反演地表形变的时间序列

分析方法。该方法将求解单个 SAR 图像形变的问题转化为一个最小二乘的问题。首先将所有获得的  $N+1$  景 SAR 数据进行两两组合,并剔除掉超过时空基线阈值的干涉对,在去除地形等相位后,剩余的  $M$  景小基线干涉图在像素  $(r, n)$  的干涉相位可以表示为

$$\Delta\varphi_j(r, n) = \varphi(t_B, r, n) - \varphi(t_A, r, n) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, r, n) - d(t_A, r, n)] \quad (3)$$

式中:  $\Delta\varphi_j$  表示第  $j$  个干涉相位图;  $d(t_A, r, n)$  和  $d(t_B, r, n)$  分别表示  $t_A$  和  $t_B$  时刻相对于参考时间  $t_0$  的地表 LOS 向形变累计量,一般假设  $d(t_0, r, n) = 0$ 。那么对于所有的  $M$  景干涉图,可以写成如下的矩阵形式:

$$\Delta\varphi = B\varphi \quad (4)$$

其中:  $B_{M \times N}$  为观测系数矩阵,其行和列分别对应于干涉图和 SAR 影像。

对于式(4)而言,如果小基线干涉对都在同一个集合之中,即  $\text{rank}(B) = N$  时,直接利用最小二乘方法就可以进行解算。如果小基线干涉对根据基线分布情况分为若干个集合,即  $\text{rank}(B) < N$  时,就需要利用奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)方法解决总体法方程秩亏的问题,将多个小基线集联合起来求解,得到覆盖整个观测时间的沉降序列。此时,还需

要将相位(形变)转换为速度,以避免 SVD 解出现跳跃<sup>[34]</sup>。目前很多国外学者已应用 SBAS 技术取代 D-InSAR 技术,进行城市地表形变监测。

尽管国外学者已开始尝试应用 SBAS 技术取代 D-InSAR 技术监测城市地表形变<sup>[35]</sup>,但将 SBAS 技术应用于矿区形变监测的实例并不多见。我国在 SBAS 技术方面的应用虽起步较晚,但已经取得了较成功的案例。河南省国土资源科学研究院的赵鸿燕等<sup>[36]</sup>选用 2004—2006 年的 6 景 ASAR 数据,采用基于相干目标的多基线距 D-InSAR 技术对河南永城煤矿区的地表形变进行反演,获取了该区域内矿区的沉降情况,为当地的矿区地质灾害监测提供了有利的数据支持。

2006 年,尹宏杰等<sup>[37]</sup>利用冷水江地区的 9 景 PALSAR 影像,采用 SBAS 技术对冷水江地区的宝大兴矿区进行差分干涉测量时序分析,得到高相干点在 SAR 影像获取时间上的沉降速率和累积沉降量。图 4 所示为应用 SBAS 技术获取的湖南冷水江宝大兴矿区附近区域的时间序列沉降图。从图 4 中可明显看出,沉降漏斗的发育演化情况,部分区域的累积沉降量高达 30 cm。图 5~7 所示为针对研究区域中沉降明显的漏斗区域 A、B 和宝大兴矿区 C 处沿行、列方向的剖面分析结果。

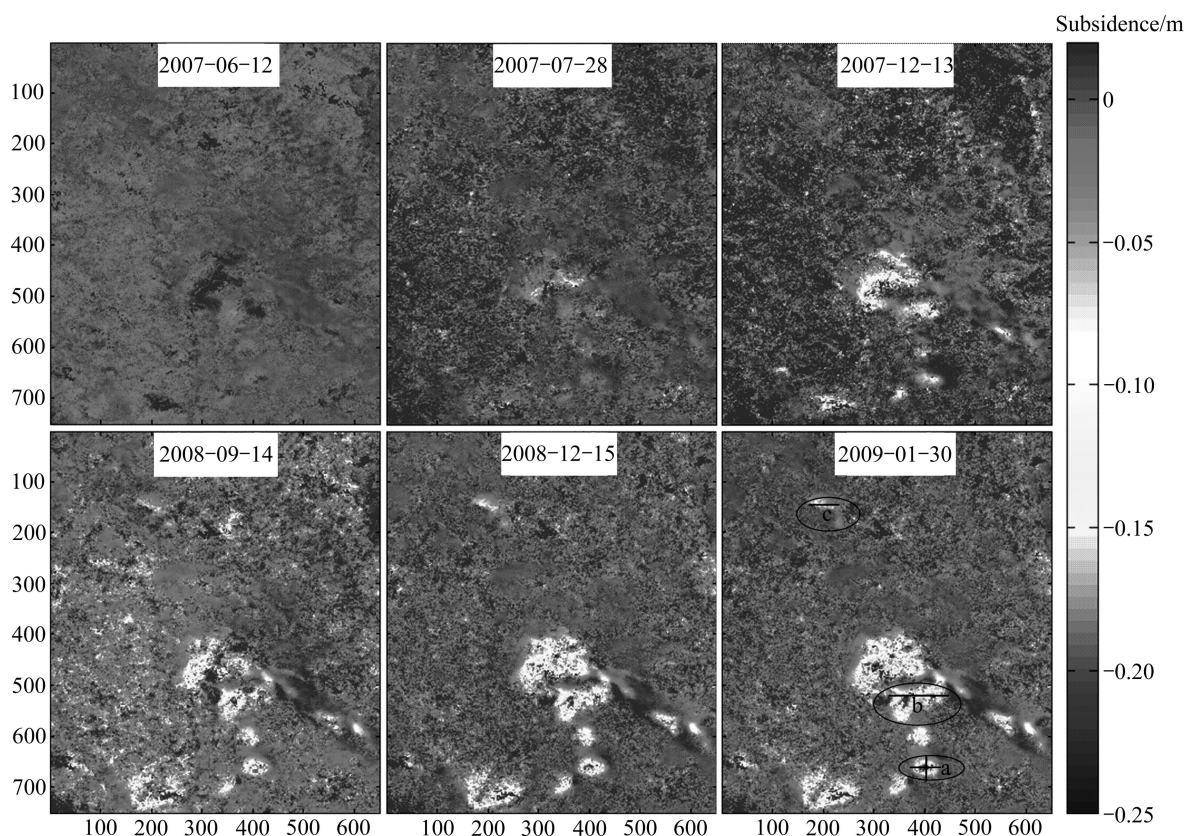


图 4 湖南省冷水江宝大兴矿区附近区域时间序列沉降图<sup>[37]</sup>

Fig.4 Time series of subsidence near Baodaxing mining area in Lengshuijiang, Hunan Province<sup>[37]</sup>

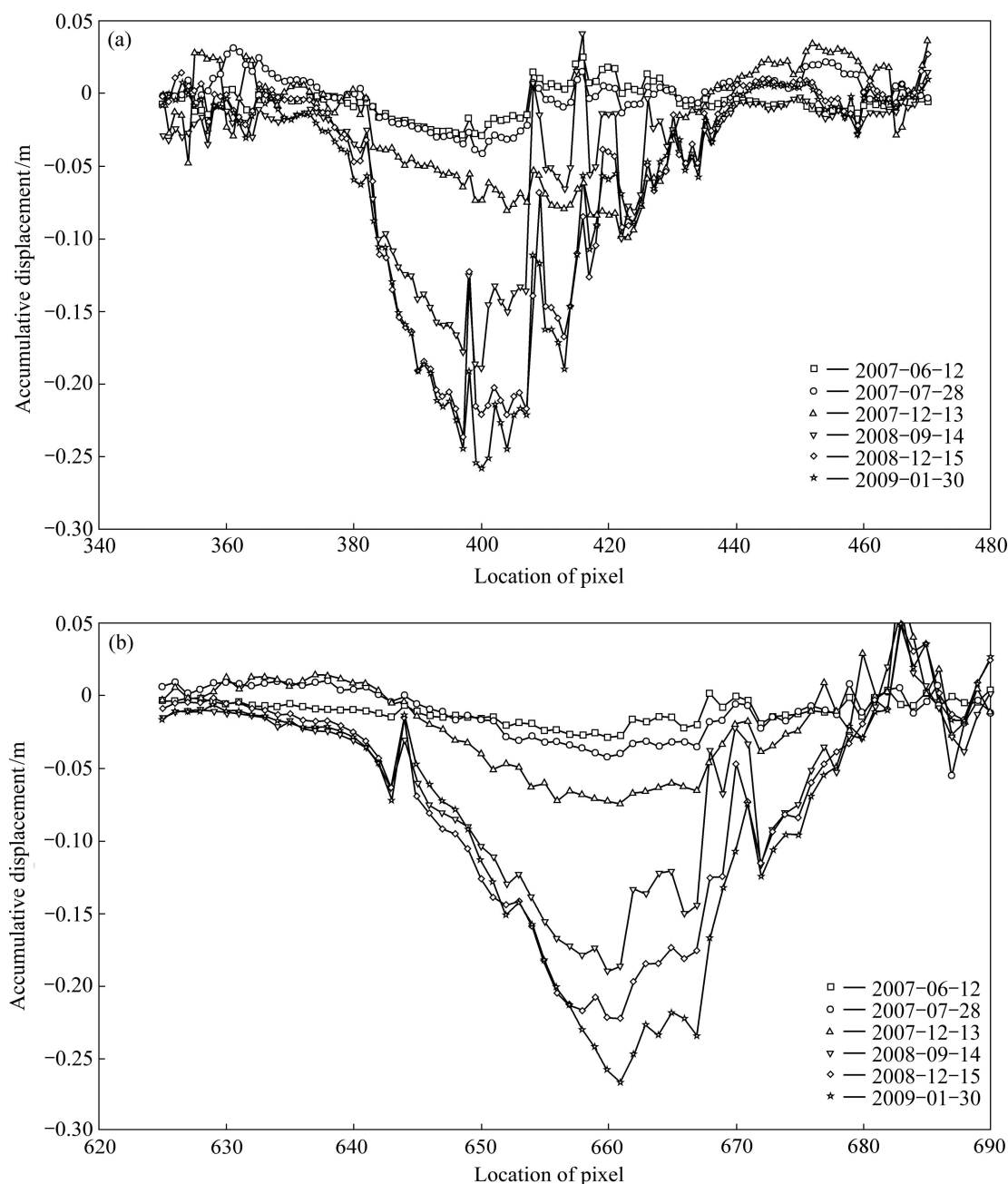


图 5 沉降漏斗 A 在行(a)和列(b)方向的时间序列沉降量剖面图<sup>[37]</sup>

Fig.5 Time series of subsidence profiles at subsidence bowl A along row (a) and column (b) directions<sup>[37]</sup>

## 2.2 PS 技术监测矿区形变

PS 技术是 1999 年 FERRETTI 等<sup>[38]</sup>提出的一项新技术。该技术通过提取研究区域内一定数量的后向散射特性在长时间内保持稳定的点(PS 点), 并结合多幅 SAR 影像进行综合相位分析, 分离出地形残差、大气等相位分量, 从而提取出形变信息。具体包括对 PS 点进行布网, 建立相邻两点间的相位差与形变速率和高程改正的函数关系模型, 通过对模型进行求解实现各相位分量的分离, 最终确定出形变分量。

应用 PS 技术进行形变解算基本原理如下: 首先需在时序 SAR 影像中选出一幅主影像, 其余影像为从影像, 将从影像分别配准并重采样到主影像上, 与主影像进行干涉, 去除平地 and 地形相位, 进而得到一组时间序列差分干涉图。然后, 通过某种阈值(如振幅离差指数)在影像上筛选出一定数量的 PS 点, 并将相邻 PS 点连接成 PS 基线, 从而构成 PS 基线网络。对于 PS 网络中任意一条 PS 基线(含 PS 点  $i$  和  $j$ ), 对这两点的相位值作差, 可建立如下模型<sup>[38]</sup>:

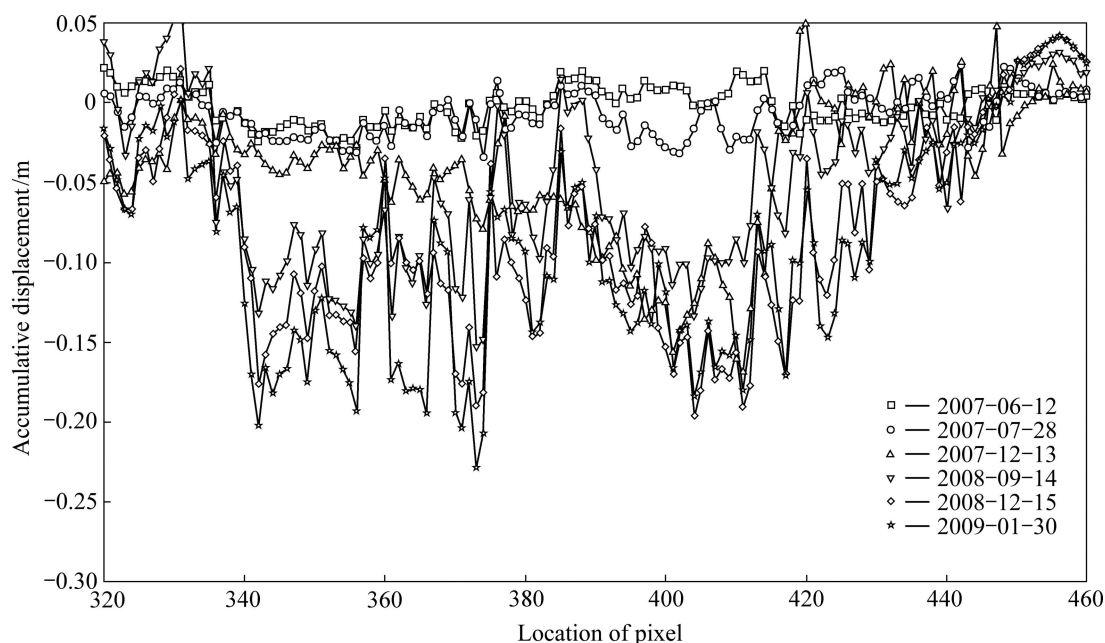


图 6 沉降漏斗 B 时间序列沉降量剖面图(行方向)<sup>[37]</sup>

Fig.6 Time series of subsidence profiles at subsiding bowl B along row direction<sup>[37]</sup>

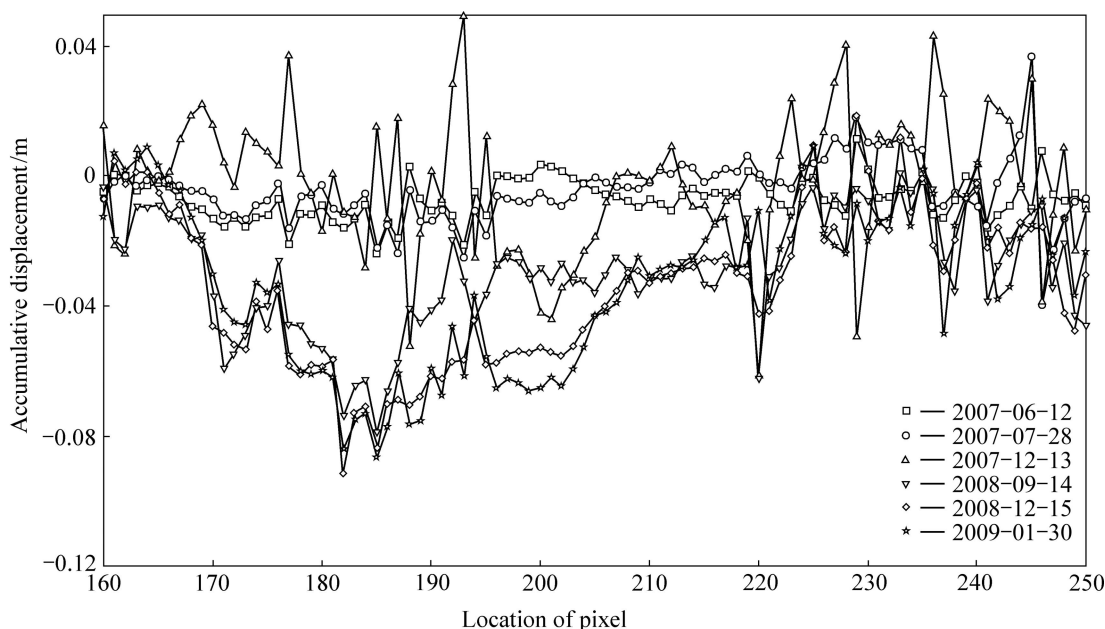


图 7 沉降漏斗 C 时间序列沉降量剖面图(行方向)<sup>[37]</sup>

Fig.7 Time series of subsidence profiles at Baodaxing mining area C along row direction<sup>[37]</sup>

$$\Delta\phi_{i,j}^m = -2\pi\Delta k_{i,j}^m + \beta_{i,j}^m\Delta\delta H_{i,j} - \frac{4\pi T^m}{\lambda}\Delta v_{i,j} + \varepsilon_{i,j}^m \quad (4)$$

式中:  $\Delta\phi_{i,j}^m$ 、 $\Delta k_{i,j}^m$ 、 $\Delta v_{i,j}$  和  $\Delta\delta H_{i,j}$  分别表示第  $m$  幅干涉图中第  $j$  点相对于第  $i$  点的干涉相位差、相位整周模糊度差、沉降速率差以及高程改正差;  $\beta_{i,j}^m$  是相位高程转换系数,可依据 SAR 影像的轨道参数信息进

行计算;  $T^m$  表示时间基线;  $\varepsilon_{i,j}^m$  则是随机误差,包括了大气延迟、噪声等因素引起的误差。

在实际计算中,对未知参数  $\Delta v_{i,j}$  和  $\Delta\delta H_{i,j}$  的求解过程为时间维相位解缠过程,目前较常用的方法有优化搜索方法<sup>[38]</sup>和整数最小二乘搜索(The least squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)方法<sup>[39]</sup>。在获取了任一 PS 基线的速率增量信息后,将任一基

线边上速率增量恢复到任一 PS 点上的过程为空间维相位解缠,目前采用的方法主要为在研究区域内选出一个假设参考点作为起算数据点进而应用总体空间平差方法求得所有 PS 点上的线性形变速率值。

PS 技术在处理过程中不受时间与空间基线的影响,通过对相邻点间相位作差减小了大气延迟相位误差,同时在模型求解过程中考虑到对外部 DEM 数据进行改正,因而克服了外部 DEM 数据时效性不强这一缺点,其监测形变的精度明显优于 D-InSAR 技术,在低相干地区具备较强的优势,近年来在监测地表变形方面已经获得广泛的应用。

在应用 PS-InSAR 技术监测矿区地表形变方面,2005 年,COLESANTI 等<sup>[40]</sup>采用 PS-InSAR 方法分析了 57 景 ERS-1/2 的降轨 SAR 影像,研究了法国 Lorraine 铁矿一个面积约 300 m×300 m 的塌陷区域的历史变形,并通过时序分析反演得到塌陷区的两个 PS 点的塌陷过程。韩世大学的 JUNG 等<sup>[41]</sup>使用 1992 年到 1998 年的 25 对 JERS 干涉数据,研究了韩国 Gaeun 煤矿区大约 1 km<sup>2</sup> 范围的地面沉降变形,由选择出来的 135 个 PS 点,测得 6 年间该矿区最大的变形为 11.2 cm,矿区地裂缝高度发育区地面平均变形速率为 0.5 mm/a<sup>[41]</sup>。尽管我国学者已尝试开展了应用 PS-InSAR 技术进行地表形变监测方面的应用研究,但多为对城市缓慢地表形变的监测,从公开发表的文献来看,应用 PS-InSAR 技术监测矿区沉降的工作比较少见。

### 2.3 CR 技术监测矿区形变

与 PS-InSAR 技术类似的 CR 技术同样是一种基于高相干目标对时间序列影像进行相位分析进而获取地面沉降信息的方法。该技术通过在监测地区布设稳定可靠的人工角反射器(CR 点),建立 CR 点上的相位变化与形变量之间关系的模型以达到对离散点进行形变监测的目的。CR 技术有着 PS 技术的所有优点,可将其视为人造的标准最佳 PS 点,依靠此技术可以精确地测量某一时间段内地表毫米级的位移。由于这些 CR 点对雷达波反射很强,经过几年的时间后,它们仍然保持着很高的相干性,有利于对研究区域进行长时间序列的持续监测,且不受时间、空间失相关影响,适用于低相干区的长时间序列形变监测。CR 点安装灵活,可自由选取研究区域进行安装,特别适合于对水库,活动构造,大坝,管线,公路,桥梁,核电站,滑坡及断层等特定区域或目标的活动监测。由于这些地区往往缺少足够数量且稳定的地面散射体,使得 PS 技术难以实现<sup>[42]</sup>。这时可以通过人为地布设一定数量、尺寸、规格严格统一并具有稳定散射特征的角反

射器,通过对这些角反射器的回波相位进行干涉测量,从而获得高精度的视线方向形变量,弥补了 PS 技术的不足。

CR-InSAR 技术进行形变监测的前期处理与 PS 技术类似,假设有  $N+1$  幅 SAR 影像,并埋设了  $M+1$  个 CR 点,选取其中一个 CR 点为参考点,一幅 SAR 影像为主影像,将其余  $N$  幅影像与主影像配准并重采样,再进行干涉处理,可形成  $N$  组干涉对,计算结果为其余  $M$  个 CR 点相对于参考点在时间序列上的形变值。具体处理过程中,需要预先在 SAR 影像上进行 CR 点的识别,并提取出其行列号信息,进而建立如下函数关系模型<sup>[43]</sup>:

$$\Delta\Phi_p^m = -2\pi\Delta k_p^m + \Delta\varphi_{\text{topo}}^{p,m} - \frac{4\pi}{\lambda}v_p T^m + S_p + \Delta\varphi_{\text{atm}}^m + \varepsilon_p^m \quad (5)$$

式中:  $p$  表示 CR 点号;  $m$  表示干涉对序号;  $\Delta\Phi_p^m$  为第  $p$  个 CR 点相对于参考 CR 点的干涉相位差;  $\Delta k_p^m$  为整周模糊度差;  $v_p$  为 CR 点相对于参考点的形变速率;  $T^m$  为时间基线;  $S_p$  为系统误差参数;  $\Delta\varphi_{\text{atm}}^m$  是大气延迟引起的相位;  $\varepsilon$  是残余相位和噪声;  $\Delta\varphi_{\text{topo}}^{p,m}$  为地形引起的相位,可利用与 CR 点并址的 GPS 等监测手段提供。

在实际计算中,式(5)中未知参数仅为整周模糊度  $\Delta k$ 、形变速率  $v$  和系统误差参数  $S$ 。求解模型式(5)中未知参数的过程与 2.2 节中 PS 技术时间维相位解缠的过程相似,可应用整周模糊度搜索方法逐步分离出未知参数,进而得出 CR 点上的最终的形变速率值  $v$ 。

CR 技术在地表形变监测方面的应用始于 1993 年初,德国波茨坦地学研究中心的 XIA 等<sup>[43]</sup>结合 ERS-1 的 SAR 图像和人工角反射器进行了试验研究工作,发现在相隔 35 d 的 SAR 图像中可以监测到 1 cm 精度的人工角反射器的上升和下降。随后, XIA 等<sup>[43]</sup>在 2000 年又把这一技术用于矿区的沉降监测,并取得了很好的结果。2004 年,他们再次应用 CR 技术监测了三峡地区的沉降,并提出该技术的算法模型<sup>[44]</sup>,2008 年, XIA<sup>[45]</sup>又在原有模型基础上进行了改进,并通过实验验证了这项技术用于监测地表沉降的实用性和可靠性。此外,1996 年, TIMMEN 等<sup>[46]</sup>利用 CR 技术对德国的图林根州维斯马特矿区进行了微形变的监测,与 GPS 的数据进行了比较,精度达到 5 mm。而在国内, CR 监测矿区地表形变的研究尚处于起步阶段。

### 2.4 综合 PS 和 CR 技术监测矿区形变

CR 技术在一定程度上可弥补 PS 技术中 PS 点分布的局限性,同时 CR 点上获取到的准确高程信息和

通过 CR 技术获取的形变量参数均可对整个高相干目标基线网络起到约束作用。因此,将 PS 与 CR 技术综合应用于形变监测将会弥补前述 PS 技术中的局限,并且可以发挥两种方法的互补优势,提高形变监测的精度。

对 PS 基线网络进行空间维解缠时,需要有起算数据点才可应用间接平差最小二乘法进行准确求解。因此综合 PS 与 CR 技术进行形变监测的基本原理可表示如图 8 所示,在网络布设过程中可将 CR 点与 PS 点共同布网,将 CR 点上获取的形变速率值及其通过 GPS 接收机获取的高程值作为 PS 基线网络的约束数据,进而通过最小二乘的方法求解出所有待求 PS 点

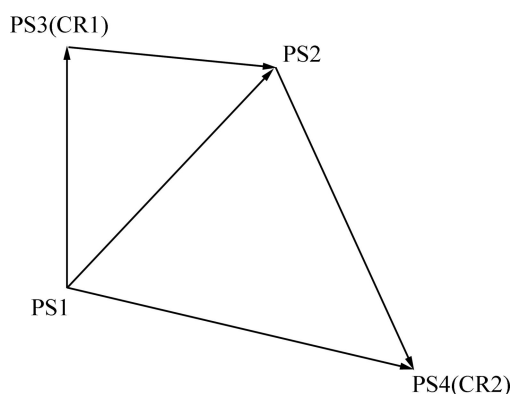


图 8 PS 基线网络模拟分布<sup>[51]</sup>

Fig.8 Simulate distribution of PS network<sup>[51]</sup>

上的未知参数  $v$  和  $\delta H$ 。这样可有效地将 CR-InSAR 与 PS-InSAR 两种技术结合,解决研究区域内无起算数据点的问题。

目前,国内外针对 PS 与 CR 技术的融合处理,并用于形变监测方面所做的研究工作并不多见。2003 年,GE 等<sup>[47]</sup>利用永久散射体(PS)和人工角反射器(CR)辅助 InSAR 技术,结合 GPS 资料对澳大利亚悉尼城开展了地面沉降观测研究,取得了较好的观测结果。2009 年,CHEN 等<sup>[48]</sup>和陈强等<sup>[49]</sup>应用 PS-InSAR 技术对香港地区形变进行监测,应用区域内的两个 GPS 控制点作为起算数据对 PS 网进行约束平差,并将 GPS 用于研究区域内的大气校正,有效地将 GPS 与 PS-InSAR 技术融合起来。在将 PS 与 CR 技术融合应用于矿区地表形变监测方面,2010 年,XING 和 ZHU<sup>[50]</sup>以及邢学敏等<sup>[51]</sup>提出了一种联合 CR 和 PS 技术的解算模型,并成功应用于河南白沙水库周边的矿区分布密集区域的地面沉降监测中。该算法将 CR 点上计算得出的形变速率值及高程改正值作为研究区域 PS 基线网络的约束,进而通过间接观测平差法估计出 PS 网沉降速率和高程改正值的全局最优解,有效实现了两种高相干技术的结合。

在实验中,采用 2007 年 2 月至 2010 年 2 月相隔 3 年的 14 景 PALSAR 影像,获取了该地区的线性速率场。图 9 所示为其获取的煤矿分布密集区的线性速率结果。从图 9 中可明显看出,研究区域内沉降最为

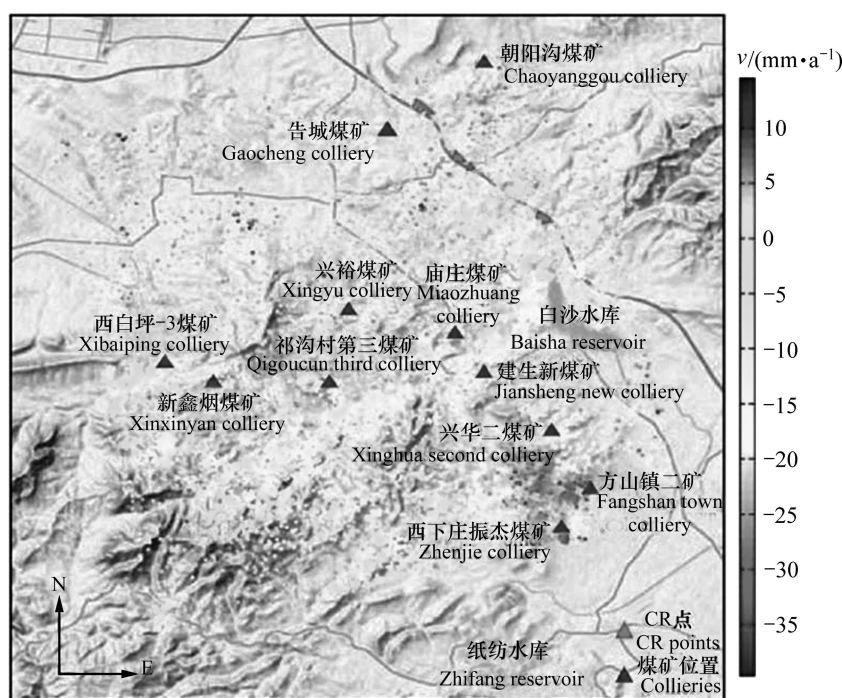


图 9 河南省白沙水库附近煤矿沉降速率图<sup>[51]</sup>

Fig.9 Deformation velocities of collieries around Baisha reservoir in Henan Province<sup>[51]</sup>

明显的漏斗区域为东南角的方山镇二矿所在位置。其年累积沉降量在斜距方向约 4 cm, 沉降的明显程度是不容忽视的。图 10 所示为其应用两个时间段内的水准验证数据对加入 CR 点约束前后的 PS 网速率场进行的外部精度对比分析结果(SZ 代表水准点)。结果表明, 加入 CR 点约束后, PS 点测量结果相比于传统方法精度有明显提高, 证明了应用 CR 点速率作为约束数据的合理性, 可修正由于参考点选取不当而出现的不合理抬升点, 更加合理地反应研究区域内矿区的真实沉降情况。

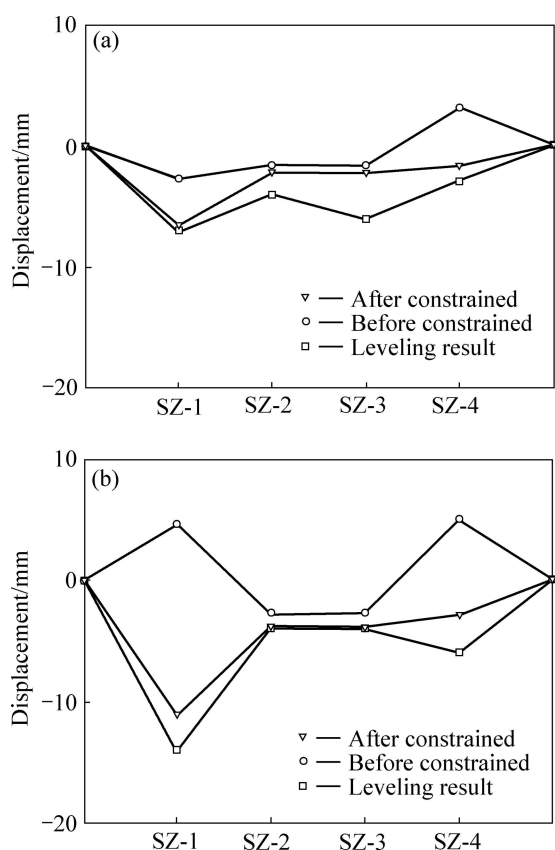


图 10 加入约束前后 PS-InSAR 结果与水准实测结果对比<sup>[51]</sup>

Fig.10 Results comparison between PS-InSAR algorithm and leveling before and after being constrained<sup>[51]</sup>

### 3 InSAR 监测矿区形变的主要问题与发展趋势

#### 3.1 InSAR 监测矿区形变的主要问题

由前所述, 矿区由于采矿活动常常造成地面沉降、滑坡、崩塌、塌陷等地质灾害, 传统的 D-InSAR 技术受限于失相关和大气等影响, 可能很难发挥作用, 而 PS、CR 及 SBAS 等高级 InSAR 技术很好的弥补了传统 D-InSAR 技术的局限性, 在矿区地表形变监测中取

得了一些成功的经验和成果。但是还存在如下不足和缺陷。

1) 对 SBAS 技术而言, 其应用是在 D-InSAR 处理结果的基础上进行后处理, 在选择干涉数据配对组合时要求非常严格, 且在差分干涉处理过程中要进行相位解缠, 这两个问题是制约其发展的重要因素, 因此仍部分依赖于研究区域的相干性。

2) 对 PS 技术而言, 其形变监测结果的精度取决于 SAR 影像的数目。一般而言, 至少综合 30 副影像才能够得到有益的结果, 这将不利于短时间内监测矿区地表形变。

3) 对 CR 技术而言, 人工角反射器的安全性存在一定问题, 难以进行有效的管理和维护。

4) 对形变速率获取而言, 由于目前矿区的地面形变复杂, 传统的线性形变模型不能很好的反映出矿区地表真实形变信息, 因此在一定程度上降低了高级 InSAR 技术的精度和可靠性。

5) 对时间序列形变获取而言, 大气延迟相位的去除是通过时空滤波来完成的, 其可靠性一直以来都没有得到很好的证明, 目前仍是制约高级 InSAR 技术监测矿区形变精度的主要问题。

6) 相对于矿山地质灾害的影响范围, 目前主要 SAR 卫星影像分辨率较低。一般 SAR 卫星的空间分辨率为几十米(多视后), 而对于一些范围只有几平方公里的矿山区域, 很难获得矿山区域地表形变细节。类似地, 现有研究中采用的主要 SAR 卫星影像的重返周期较长(一般都在一个月以上), 矿山区域的地表形变速度都较大(每个月的沉降可多达数十厘米), 如果 SAR 卫星的重返周期太长将使地表形变超过 InSAR 技术能监测的能力, 并且相隔时间过长容易造成时间失相干, 更重要的是无法实现对矿山地表形变的动态监测和预测。

#### 3.2 InSAR 监测矿区形变的发展趋势

常规 D-InSAR 技术受时空失相关和大气延迟相位影响等问题的影响, 严重制约着其在形变监测结果中的精度和可靠性; 基于多幅影像数据进行时序分析的高级 InSAR 技术(包括 SBAS、PS 和 CR 技术)的应用很大程度的弥补了传统 D-InSAR 技术的不足, 将是今后矿区地表形变监测的主要技术手段。CR 技术可弥补 PS 技术空间上的分辨率, 且 CR 的强反射特性和安装的灵活性可作为 PS 技术的约束, 进一步提高 PS 技术形变监测的精度, 因此, 综合利用 PS 与 CR 技术也将在矿区形变监测中发挥强有力的优势, 有着极大的应用前景。而针对目前主要 SAR 卫星影像时空分辨

率较低的问题,新一代的 SAR 卫星对硬件上的缺陷和不足都有很大提高和改进。如 COSMO-SkyMed 卫星的空间分辨率达到 3 m(strip map)甚至 1 m(Spotlight),即使多视后也可以达到 5~10 m;不仅如此,新一代高分辨率 SAR 卫星在重返周期上也有大幅提升,目前 COSMO-SkyMed 的重返周期已经达到 8 d,未来还可以实现 1~2 d 的重返周期。由于传统 SAR 数据的时空分辨率限制,近几年来,国际上陆续应用高分辨率 TerraSAR, COSMO-SkyMed 卫星数据结合高级 InSAR 技术进行形变监测,获取的形变信息更加真实,精度也有较大改善。TAXIO 等<sup>[52]</sup>通过处理 30 景 TerraSAR 影像,检测出威尼斯沿岸大坝在 2008 年 3 月至 2009 年 1 月间存在着厘米级的形变。PRATI 等<sup>[53]</sup>通过对意大利多塞纳的实验仔细的对比分析了采用高分辨率影像与传统 C 波段卫星影像处理的结果,指出高分辨率影像提取出的 PS 点密度高,更适用于非城区的形变监测。由此可见,新一代高分辨率 SAR 卫星可以满足矿山区域高时空分辨率以及高精度地表形变监测的需求。从国内外的研究现状来看,高分辨率影像在矿区地表形变监测中的应用并不多见。因此,将新一代高分辨率 SAR 卫星数据引入矿区地表形变监测中将有着极大的应用前景。

综上所述,将高级 InSAR 技术与高分辨率 SAR 影像协同应用于监测矿区地表形变,可为后续矿区地质环境一体化管理工作提供数据支撑,进而实现由于采矿和破坏性开采造成的地质灾害的监测,对于矿区地质灾害预警和生态环境评估都具有重要的现实意义。

## 4 结论

1) 传统 D-InSAR 技术在矿区形变监测过程中受时间和空间相关影响较严重,而且矿区地质环境特殊(如植被覆盖严重,且易产生塌陷和积水等),从而使传统 D-InSAR 技术的应用受到限制。

2) 基于多幅 SAR 影像数据进行时序分析的高级 InSAR 技术(包括 SBAS, PS, CR 以及综合 PS 和 CR 技术)的应用很大程度地弥补了传统 D-InSAR 技术的不足,在矿区地表形变监测中有着很大的应用前景,将是今后矿区地表形变监测的主要技术手段。

3) 以往的中等 SAR 卫星数据时空分辨率难以满足矿区形变监测需求,而新一代的 SAR 卫星(如 TerraSAR, COSMO-SkyMed 等)在空间分辨率和重返周期上均有大幅提升。因此,采用高分辨率 SAR 数据对矿区形变进行精细监测,是未来矿区地表形变监测的发展趋势。

## REFERENCES

- [1] 陈国沛, 刘云华, 单新建. PS-InSAR 技术在北京采空塌陷区地表形变测量中的应用探析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 59-63.  
CHEN Guo-hu, LIU Yun-hua, SHAN Xin-jian. Application of PS-InSAR technique in the deformation monitoring in mining collapse areas in Beijing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2): 59-63.
- [2] 刘国祥. 合成孔径雷达遥感新技术: InSAR 介绍[J]. 四川测绘, 2004, 27(2): 92-95.  
LIU Guo-xiang. A new technology of microwave remote sensing: Introduction to synthetic aperture radar interferometry[J]. Surveying and Mapping of Sichuan, 2004, 27(2): 92-95.
- [3] 廖明生, 林 瑋. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003: 111-114.  
LIAO Ming-sheng, LIN Hui. Synthetic aperture radar interferometry—Principle and signal processing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003: 111-114.
- [4] 李 陶. 重复轨道星载 SAR 差分干涉监测地表形变研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.  
LI Tao. Study on surface deformation monitoring by repeat pass spaceborne SAR differential interferograms[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [5] ZEBKER H A, VILLASENOR J. Decorrelation in interferometric radar echoes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 950-959.
- [6] LIU G X, LI J, XU Z. Surface deformation associated with the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake from ALOS L-band SAR interferometry[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 12: 496-505.
- [7] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, LI F K, RODRIGUEZ E. Synthetic aperture radar interferometry[C]// Proceedings of IEEE SAN JOSE. USA, 2000, 88(3): 333-382.
- [8] 张 红, 王 超, 吴 涛, 汤益先. 基于相干目标的 D-InSAR 方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 4-11.  
ZHANG Hong, WANG Chao, WU Tao, TANG Yi-xian. Research of coherent target interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2009: 4-11.
- [9] CLOSA J. The influence of orbit precision in the quality of ERS SAR interferometric data[EB/OL]. [1999]. <http://earthl.esrin.esa.it/>.
- [10] SCHARROO R, VISSER P N, METS J G. Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 8113-8127.
- [11] MURAKAMI M, TOBITA M, FUJIWARA S, SAITO T, MASASARU H. Coseismic crustal deformations of the 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometric JERS 1 synthetic aperture radar[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 8605-8614.
- [12] DING X L, LI Z W, ZHU J J, HUANG C. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation[J]. Sensors, 2008,

- 8(9): 5426–5448.
- [13] HANSSEN R H. Radar interferometry: Data interpretation and error analysis[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 72–74.
- [14] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035–4038.
- [15] LI Z W, DING X L, HUANG C, ZHU J J, CHEN Y L. Improved filtering parameter determination for the goldstein radar interferogram filter[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63: 621–634.
- [16] LEE J S, PAPATHANASSIOU K P, AINSWORTH T L, GRUNES M R, REIGBER A. A new techniques for noise filtering of SAR interferogram phase images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1456–1465.
- [17] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713–720.
- [18] CHEN C W, ZEBKER H A. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2001, 18: 338–351.
- [19] 王桂杰, 谢谟文, 邱 骋, 江崎哲郎. D-InSAR 技术在大范围滑坡监测中的应用[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1337–1344.  
WANG Gui-jie, XIE Mo-wen, QIU Cheng, ESAKI T. Application of D-InSAR technique to landslide monitoring[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1337–1344.
- [20] CARNEC C, MASSONNET D, KING C. Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(4): 3579–3582.
- [21] CARNEC C, DELACOURT C. Three years of mining subsidence monitored by SAR Interferometry near Gardanne France[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 43: 43–54.
- [22] RAUCOULES D, MAISONS C, CAMEC C, MOUELIC S L, KING C, et al. Monitoring of slow ground deformation by ERS Radar Interferometry on the Vauvert Salt Mine (France)—Comparison with ground-based measurement[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(4): 468–478.
- [23] GE L L, RIZOS C, HAN S, ZEBKER H. Mining subsidence monitoring using the combined InSAR and GPS approach[C]//*Proceedings of the 10th International Symposium on Deformation Measurements*. California: International Federation of Surveyors (FIG), 2001: 1–10.
- [24] GE L L, CHANG H C, RIZOS C. Mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(3): 259–266.
- [25] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 廖明生. 工矿区地表沉降 D-InSAR 监测试验研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2005, 26(8): 778–782.  
WU Li-xin, GAO Jun-hai, GE Da-qing, LIAO Ming-sheng. Experimental study on surface subsidence monitoring with D-InSAR in mining area[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2005, 26(8): 778–782.
- [26] 董玉森, GE Lin-lin, CHANG Hsing-chun, 张 志. 基于差分雷达干涉测量的矿区地面沉降监测研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(10): 888–892.  
DONG Yu-sen, GE Lin-lin, CHANG Hsing-chun, ZHANG Zhi. Mine subsidence monitoring by differential InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10): 888–892.
- [27] 刘国林, 张连蓬, 成 枢, 江 涛. 合成孔径雷达干涉测量与全球定位系统数据融合监测矿区地表沉降的可行性分析[J]. *测绘通报*, 2005, 11: 10–13.  
LIU Guo-lin, ZHANG Lian-peng, CHENG Shu, JIANG Tao. Feasibility analysis of monitoring mining surface substance using InSAR/GPS data fusion[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005, 11: 10–13.
- [28] 宁树正, 万余庆, 孙顺新. 煤矿区沉降与遥感监测方法探讨[J]. *中国煤炭地质*, 2008, 20(1): 10–12.  
NING Shu-zheng, WAN Yu-qing, SUN Shun-xin. A discussion of coal mining area subsidence and remote sensing monitoring[J]. *Coal Geology of China*, 2008, 20(1): 10–12.
- [29] 李晶晶, 郭增长. 基于 D-InSAR 技术的煤矿区开采沉降监测[J]. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 25(4): 306–309.  
LI Jing-jing, GUO Zeng-zhang. Basing on the technology of D-InSAR in mining subsidence of coal mine area[J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 2006, 25(4): 306–309.
- [30] YANG C S, ZHANG Q, ZHAO C Y, JI L Y. Monitoring mine collapse by D-InSAR[J]. *Minning Science and Technology*, 2010, 20(5): 696–700.
- [31] 侯建国, 杨成生, 王亚男, 王宏宇, 等. 煤矿开采沉降监测—基于合成孔径雷达差分干涉测量的研究[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(6): 71–75.  
HOU Jian-guo, YANG Cheng-sheng, WANG Ya-nan, WANG Hong-yu. Monitoring of subsidence induced by coal mining: a research based on differential SAR interferometry[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(6): 71–75.
- [32] 尹宏杰. 基于 InSAR 的矿区地表形变监测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
YIN Hong-jie. Ground subsidence monitoring in mining area using InSAR[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [33] 刘国祥. 利用雷达干涉技术监测区域地表形变[M]. 北京: 测绘出版社, 2006: 39–40.  
LIU Guo-xiang. Monitoring of ground deformations with radar interferometry[M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 2006: 39–40.
- [34] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, SANSOSTI E, 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.
- [35] LANARI R, MORA O, MANUNTA M, MALLORQUI J J, BERARDINO P, et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*

- Sensing, 2004, 42(7): 1377–1386.
- [36] 赵鸿燕, 魏也纳, 戴立乾. 多基线距 D-InSAR 反演河南省永城煤矿区地形形变[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 91–94.
- ZHAO Hong-yan, WEI Ye-nan, DAI Li-qian. Surface deformation from 2004 to 2006 on Yongcheng Coal Mining Area by Multibaseline D-InSAR in Henan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(4): 91–94.
- [37] 尹宏杰, 朱建军, 李志伟, 丁晓利, 汪长城. 基于 SBAS 的矿区形变监测研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 52–58.
- YIN Hong-jie, ZHU Jian-jun, LI Zhi-wei, DING Xiao-li, WANG Chang-cheng. Ground subsidence monitoring in mining area using D-InSAR SBAS algorithm[J]. Acta Geodaetica Cartographica Sinica, 2011, 40(1): 52–58.
- [38] FERRETTI A, ROCCA F, PRATI C. Permanent Scatters in SAR interferometry[C]//Proceedings of IGARSS 1999. Hanburg: IEEE, 1999: 1528–1530.
- [39] KAMPES B M, HANSSEN R F. Ambiguity resolution for permanent scatterer interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2446–2453.
- [40] COLESANTI C, LE MOUËLIC S, BENNANI M, RAUCOULES D, CARNEC C, et al. Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique—A case study in the east of France[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(1): 201–207.
- [41] JUNG H C, KIM S W, JUNG H S, MIN K D, WON J S. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis[J]. Engineering Geology, 2007, 92(1/2): 1–13.
- [42] 张景发, 龚利霞, 姜文亮. PSInSAR 技术在地壳长期缓慢形变监测中的应用[J]. 国际地震动态, 2006, 330(6): 1–6.
- ZHANG Jing-fa, GONG Li-xia, JIANG Wen-liang. Application of PS InSAR technique to measurement of long-term crustal deformation[J]. Recent Developments in World Seismology, 2006, 330(6): 1–6.
- [43] XIA Y, KAUFMANN H, GUO X F. Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-InSAR and corner reflectors[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(10): 1167–1172.
- [44] XIA Y, KAUFMANN H, GUO X. Differential SAR interferometry using corner reflectors[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto: IEEE, 2002: 1243–1246.
- [45] XIA Y. CR-based SAR-Interferometry for landslide monitoring[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston: IEEE, 2008: 1239–1242.
- [46] TIMMEN L, XIA Y, CRISTOPH R, REIGBER C, HARTMANN R, FIKSEL T. Monitoring of small motions in mining areas by SAR interferometry[J]. ESA Special Publications, 1996: 96.
- [47] GE L L, CHENG E, LI X J, RIZOS C. Quantitative subsidence monitoring: The integrated InSAR, GPS and GIS approach[C]//The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services. Melbourne, 2003: 22–25.
- [48] CHEN Q, LIU G X, DING X L, HU J C, YUAN L G, et al. Tight integration of GPS observations and persistent scatterer InSAR for detecting vertical ground motion in Hong Kong[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(6): 477–486.
- [49] 陈强, 丁晓利, 刘国祥. 雷达干涉 PS 网络的基线识别与解算方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2230–2236.
- CHEN Qiang, DING Xiao-li, LIU Guo-xiang. Baseline recognition and parameter estimation of persistent-scatterer network in radar interferometry[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(9): 2230–2236.
- [50] XING X M, ZHU J J. Linear subsidence monitoring in mining area using constrained PSInSAR[J]. ICIC Express Letters, 2010, 1(2): 247–253.
- [51] 邢学敏, 丁晓利, 朱建军, 汪长城, 丁伟, 等. CRInSAR 与 PSInSAR 联合探测区域线性沉降研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1193–1204.
- XING Xue-min, DING Xiao-li, ZHU Jian-jun, WANG Chang-cheng, DING Wei, et al. Radar differential interferometry based on permanent scatterers and its application to detecting regional ground subsidence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(5): 1193–1204.
- [52] TAXIO S, PIETRO T, LUIGI T. Terra SAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on Venice coastland stability[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2682–2688.
- [53] 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.

(编辑 李艳红)

## 朱建军教授简介

朱建军, 1962 年出生, 湖南双峰人, 博士, 教授, 博士生导师, 中南大学图书馆馆长兼地球科学与信息物理工程学院副院长, 全国政协委员、民革湖南省委副主委, 国际矿山测量协会委员, 中国测绘学会大地测量专业委员会委员, 中国测绘学会矿山测量专业委员会副主任, 国家自然科学基金委学科评审组成员。主要从事测量平差与数据处理、GPS、InSAR 和极化干涉数据处理、变形测量的理论研究与工程实践。主持完成国家“863”和国家自然科学基金等项目 30 余项, 获国家技术发明二等奖、教育部科自然科学基金一等奖等科技奖励 10 余项。2006 年获国务院特殊津贴, 2008 年获夏坚白测绘事业创业与科技创新奖, 2010 获国家精品课 1 门。在国内外学术刊物上发表论文 100 余篇, 其中被 SCI 收录 30 多篇, 出版专著 1 部。