

综述与专论

RS 技术在矿区地表沉陷监测中的研究进展

刘俊蓉^{1,2}, 刘发民², 李毅¹

(1.甘肃农业大学林学院,甘肃兰州 730070;2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃兰州 730000)

摘要: 该文综合分析了国内外矿区地表沉陷监测技术的发展历程及现状,并结合遥感(RS)监测技术在矿区地表沉陷监测中的应用成果,指出:相比传统监测技术,利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术和差分干涉测量(D-InSAR)技术能够对矿区地表沉陷进行高覆盖、高分辨率、高精度、实时动态的监测,但在实际应用中,D-InSAR 技术会受系统本身因素、大气条件、地面植被、时间和空间等因素的影响。随后发展起来的 PS-InSAR、CR-InSAR 及 SBAS 技术克服了 D-InSAR 技术的不足,却仍存在缺陷。随着 RS 技术不断发展,在实际应用中将传统监测手段与遥测技术进行优势互补,同时把具有强大空间分析能力和表达优势的 GIS 技术与 RS 技术相互融合,可对矿区地表沉陷做出全新、快速、有效的监测和预测。

关键词: 矿区地表沉陷;遥感监测;InSAR;D-InSAR;GIS

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2014)06-001-06

THE RESEARCH DEVELOPMENT OF REMOTE SENSING TECHNOLOGY IN THE MONITORING OF MINING AREA SURFACE SUBSIDENCE

LIU Jun-rong^{1,2}, LIU Fa-min², LI Yi¹

(1.Gansu Agricultural University,Lanzhou,730070; 2.Cold and arid regions environmental and engineering research institute, Chinese academy of sciences,Lanzhou,730000)

Abstract: Based on analysis of the present situation and the application of RS monitoring technology in the mining area surface subsidence monitoring all around the world, this review points out that SAR interferometry (InSAR) technology, Differential InSAR (D-InSAR) technology, and the advanced InSAR technologies have more advantages in monitoring mining area surface subsidence, such as high coverage, high resolution, high precision, real-time and dynamic monitoring. However, the monitoring precision of RS technology can be affected by the system, atmospheric conditions, ground vegetation, time and space, and so on. In order to solve these problems, PS-InSAR, CR-InSAR and SBAS were presented, but the three technologies still have some defects. As with the development of RS technology, RS monitoring technology can be combined with conventional monitoring technology and GIS technology which has powerful spatial analysis ability and express advantage to monitor and predict the mining area surface subsidence more and more quickly and effectively.

Key words: Mining area surface subsidence; Remote sensing monitoring; InSAR; D-InSAR; GIS

矿区地表沉陷问题由来已久。开采矿产资源所形成的大范围采空区是导致矿区地面发生大面积沉陷的主要原因。其沉陷案例在世界各矿产资源大国普遍存在并不断蔓延^[1-3]。矿区地表沉陷的危害涉及环境^[4]、经济^[5]、社会^[6]等各方面:(1)严重破坏矿区周边建筑、工程、水利、道路、交通设施、农田、居民区、湖泊河流等^[7-8];(2)污染物渗入地下水,污染地下水源^[9];(3)矿区沉陷会对生命财产安全和当地的经济安全产生严重影响^[10];(4)阻碍社会的和谐与可持续发展^[11]。因此,深入研究地面沉陷形成机理及其变化规律,并采取一定手段监测矿区地表沉陷,对合理开采地下矿产资源,控制矿区地表沉陷,实现煤矿业的可持续发展意义重大。

1 矿区地表沉陷监测技术发展历程

早在 19 世纪中叶,很多国家就已经开始关注矿物开采引发的地表沉陷问题,深入研究了其形变规律,并取得了丰硕的成果^[12]。20 世纪 50 年代,我国也开始致力于矿区地表沉陷问题的研究,并建立了一批岩层与地表移动观测站,其中,开滦“黑鸭子”观测站的建立标志着我国矿产开采沉陷变形观测及其研究工作的开始^[13]。随着人们对矿区沉陷问题研究的日益深入,矿区沉陷监测的手段也由精密水准测量、静态或动态 GPS 测量、电子测距测量、远程电子监控等传统技术,发展为利用遥感(RS)技术对矿区地表沉陷进行全天候、高精度的监测。

1.1 传统监测技术

传统的矿区沉陷监测手段通常采用的是大地水准测量和 GPS 测量方法^[14]。其中,大地水准测量需要大量野外作业,且测量周期长、花费大、易产生误差、控制面及控制精度不足,难以系统、全面、实时、可靠的掌握区域地面沉陷的分布情况^[15,16];而 GPS 定位技术自动化程度高、精度高、观测周期短^[17],因此,相比较大地水准测量及其它常规测量方式,使用 GPS 技术进行地面沉陷监测,可获得较满意的结果和精度^[18]。尽管 GPS 测量解决了大地水准测量作业周期长的问题,但仍无法达到很高的空间分辨率,不能满足大范围、长期重复监测的要求^[19,20]。因此,随着科学技术的不断发展,有必要将一些新的技术手段应用到矿区的沉陷监测工作中,而 RS 技术高覆盖、高分辨率、高精度的特点使得其监测矿区地表沉陷成为可能。

1.2 遥感监测技术

近年发展起来并在矿区沉陷监测中得以广泛应用的主动式微波遥感技术主要有:合成孔径雷达干涉测量(Synthetic Aperture Radar interferometry, InSAR)技术,及其差分干涉测量模式(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR)技术^[21],InSAR 和 D-InSAR 技术因具有全天候、全天候、高覆盖、高精度和高自动化的地表形变探测能力,而在国内外矿区沉陷监测中取得了很大成果^[22,25]。其中,InSAR 技术始于 1969 年,首次应用 SAR 技术对金星和月球表面进行观测,随后欧美等国家开始利用该技术生成大规模 DEM 并用其监测地表形变^[26]。InSAR 技术融合了合成孔径雷达成像原理以及电磁波干涉技术,理论上可以获得非常精确的数字高程模型和毫米级的地表形变信息^[15]。我们既可以利用 InSAR 进行目标区域范围内的监测;也可利用存档 SAR 影像对沉陷区域进行历史评估^[27]。而随后发展起来的 D-InSAR 技术是对 InSAR 技术的延伸,InSAR 技术则是 D-InSAR 技术的基础^[20]。D-InSAR 技术起初主要应用于形变较明显的火山^[28]、地震^[29]监测,随着技术研究的不断深入,人们将其逐渐应用于冰川移动^[30]、山体滑坡^[31]、地面沉陷^[32]等连续形变的监测,并取得了一定成果,解决了许多实际问题。

尽管利用 InSAR 和 D-InSAR 技术进行矿区地表沉陷监测要优于传统的监测技术,但在实际应用中,其精度和适用性会受到系统本身因素、湿度、大气条件、地面植被及时间和空间等因素的影响^[33]。鉴于此,国内外学者们尝试使用多幅时序 SAR 影像对矿区进行时间序列沉陷分析。目前,使用多幅 SAR 影像进行时序差分干涉处理的方法主要有:永久散射体(Permanent Scatters, PS)技术、人工角反射器(Corner Reflector, CR)技术和小基线集(Small Baseline Subset, SBAS)技术,有学者将这三项技术称为高级 InSAR 技术^[34]。PS-InSAR 技术是 Ferretti 等人于 2000 年提出,从该技术提出至今十多年期间,许多学者开展了大量相关研究,并取得了一定成就^[35-37];CR-InSAR 技术类似 PS-InSAR 技术,它是基于高相干目标对时间序列影像进行相位分析,从而获取地面沉陷信息,CR-InSAR 技术具有 PS-InSAR 技术的所有优点,可视其为人造标准最佳 PS 点,用该技术可以精确测量某一时间段内地表 mm 级的形变^[34];SBAS-In-

SAR 技术是 Berardino 等人于 2002 年提出, 该方法是利用多幅干涉 SAR 影像反演地表形变的时间序列^[38]。此后, 又有学者提出了测量地表形变速率精度更高的 PS-InSAR 与 CR-InSAR 联合解算算法^[39]、可视化显示地面沉降信息的 InSAR 或 D-InSAR 技术融合 GIS 技术的方法^[40-42]。总之, 随着 RS 技术的迅速发展, 传统监测手段与遥测技术之间优势互补, RS 技术与 GIS 技术相互融合, 使得人们可利用越来越先进的矿区沉降监测手段对矿区地表沉降做出全新、快速、有效的监测和预测。

2 RS 技术在矿区地表沉降监测中的应用实例

RS 技术是监测矿区地表沉降的有效工具^[43]。国外包括美国、英国、澳大利亚、韩国、土耳其、法国和波兰等国家已经开展了大量的研究工作, 近些年, 中国也在此方面积累了许多经验^[44, 45]。

2.1 国外应用实例

1989 年 Gabriel^[46]首次将 D-InSAR 技术应用用于地表形变监测研究中, 论证了 SAR 可用于厘米级的地表形变监测中; 1993 年 Massonnet^[20]通过实验研究发现, 利用 D-InSAR 技术进行地表形变监测是可行的, 随后很多国家开始利用 D-InSAR 技术监测矿区地表沉降; 2001 年 Ge^[47] 等将 GPS 和 InSAR 技术结合起来进行矿区地表沉降监测, 精确获取了研究区煤矿开采造成的地面沉降信息; 随后在 2003 年 Ge^[48] 等人融合了 GPS 和 InSAR 技术并利用具有强大空间分析能力的 GIS 技术的叠加分析功能, 把矿区航拍影像图和矿区工作区图叠加起来, 清晰的显示了矿区地表沉降情况; 2007 年 Ge^[49] 等人采用多源 SAR 数据, 对矿区沉降情况进行了相关研究, 研究发现, 在矿区植被存在的情况下, L 波段数据受时间失相干影响较小, 得到的结果更加可靠; 2008 年 Baek^[50] 等人利用 InSAR 技术, 结合 SBAS 方法和 GIS 技术, 对 23 景 1992 至 1998 年韩国江原道矿区的 JERS-1 影像进行了研究, 通过空间数据分析发现, 该矿区的沉降主要发生在煤矿开采后留下的煤洞上方及裂缝处; 2010 年 Herrera^[51] 等人利用 D-InSAR 和 CPT 技术对西班牙一露天矿区的地表沉降和边坡滑坡现象进行了分析研究, 可见, RS 技术在矿区边坡及复垦监测中同样可以发挥很大的作用。

2.2 国内应用实例

相比国外, 我国运用 RS 监测技术进行矿区地表沉降监测起步较晚, 但是经过十多年的发展, 我国在遥测技术的算法、软件等各方面越来越成熟, 应用案例也越来越多。2005 年吴立新^[45] 运用 5 景 ERS-1/2 影像对唐山及开滦矿区因煤矿开采引起的地表沉降进行了研究, 得到了该区半年内的雷达视线向 (LOS) 形变图, 并最终得出为了削弱 D-InSAR 技术缺陷, 可以利用多时相 D-InSAR 技术结合角反射器进行矿区地表沉降监测的结论。2007 年李学军^[52] 利用 InSAR 技术对大同煤矿区进行监测, 得出了大同矿区地表沉降与开采沉降一致的结论。2009 年张勤^[53] 等人利用 GPS 和 InSAR 技术研究了西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征, 揭示了西安地面沉降与时空演化特征和机理, 为西安地面沉降监测与预防提供了科学依据。2010 年余景波^[54] 等人利用 6 景济宁矿区的 ENVISAT ASAR 数据, 并结合 D-InSAR 技术对该矿区的地面沉降进行了监测, 验证了 D-InSAR 技术在矿区地表沉降监测中的可行性。2011 年邢学敏^[59] 利用 CR-InSAR 与 PS-InSAR 技术联合反演了河南矿区时序沉降, 该技术克服了 D-InSAR 技术的不足, 提高了矿区地表沉降监测的精度和可靠性。2012 年陶秋香^[55] 等人使用 L 和 C 波段雷达干涉数据分析了位于济宁煤矿区的地面沉降情况, 研究结果表明 L 和 C 波段有较强的矿区地表沉降监测能力, 但由于受到植被覆盖等其他失相干因素的影响, 其实际监测能力被弱化; 同年, 王珊珊^[40] 等人提出了基于 InSAR 监测数据, 用 GIS 技术开展矿区地表沉降动态分析的技术流程, 建立了矿区地表沉降时空分析软件平台, 并用该平台获取了 2008 年 12 月至 2009 年 7 月间山东省济北煤矿西北部地面沉降的时空变化规律, 为该区公路和建筑因地面沉降影响而形变提出了治理预警。此外, 刘金龙^[56] 等人将 L 波段和 C 波段联合使用, 利用多模式雷达数据对河北峰峰煤矿地表沉降情况进行了监测, 结果证明了该技术的可行性。2013 年胡俊^[57] 开展了基于 BFGS 法融合 InSAR-GPS 技术监测地表三维形变的研究, 该方法融合 GPS 和 InSAR 技术监测地表高空间分辨率三维形变, 实验证明, 此方法能够得到高精度的地表三维形变速率场。同年, Zhang^[41] 等人利用 RS 技术的动态监测功能结合 GIS 技术的空间分析能力和数据集合能力, 提取了淮南市矿区沉降信息。

研究发现,该矿区沉陷范围和强度的不同主要取决于煤矿开采年限、规模、开采方式、地下水位、表土覆盖度、尤其是煤层的倾斜度等因素。

以上研究案例表明,(1)在矿区地表沉陷监测中将遥测技术和常规的监测技术之间优势互补可以提高监测的准确性;(2)遥测技术和 GIS 技术的结合可更直观表达矿区地表沉陷情况;(3)CR-InSAR 与 PS-InSAR 技术可克服 D-InSAR 技术的缺陷,更精确的对沉陷地表进行监测。

3 RS 监测技术存在的问题

虽然目前普遍使用的各类 RS 技术在矿区地表沉陷监测中取得了许多成果,并展现出了广泛的应用潜力,但仍存在一些不足和局限。

3.1 D-InSAR 技术的不足

D-InSAR 技术的不足之处表现在以下几个方面:(1)当研究区域内有冰雪或植被等覆盖物时,D-InSAR 技术在空间上的相干性或被削弱,而较长时间的空间基线也会导致严重的空间失相关现象,进而影响 D-InSAR 的处理效果^[14];(2)D-InSAR 技术容易受到大气延迟相位的影响,从而降低获取的地表形变的精度^[19];(3)在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发生变化,从而导致 D-InSAR 处理的差分干涉图效果不理想,影响其地表形变监测的精确性和可靠性^[58,59];(4)矿区开采引起的地面沉陷速率可能会超出 D-InSAR 的形变监测能力范围。

3.2 高级 InSAR 技术的不足

虽然 PS-InSAR、CR-InSAR 及 SBAS 等技术弥补了 D-InSAR 技术的不足,并在矿区沉陷监测中取得了一些成就,但是还存在缺陷和不足:(1)PSInSAR 技术克服了大气影响和图像失相干等限制因素,并扩展了 D-InSAR 技术在提取大面积微小形变上的应用,但基于亮度离散度和先验形变模型的 PSInSAR 也有一定的局限性^[60],其相关理论、算法及建模方法仍存在诸多需要解决的问题^[61];(2)对 CRInSAR 技术而言,人工角反射器的安全性存在问题,并且很难进行有效的管理和维护;(3)矿区地表沉陷情况复杂,而传统的线性模型又不能很好的反映真实的地面形变情况,由此在一定程度上降低了 PS-InSAR、CR-InSAR 及 SBAS 的精度和可靠性;(4)制约 PS-InSAR、CR-InSAR 及 SBAS 技术的大气延迟相位的去除方法可靠性

不确定,仍然制约着监测煤矿区地表形变精度。

3.3 InSAR-GIS 技术的不足

InSAR 技术与 GIS 的结合可为矿区地表沉陷监测提供了更强大的功能,但是也存在不足之处:(1)该技术还处于初级阶段,没有形成完善的理论体系和技术路线;(2)矿区沉陷时空分析缺乏系统性,使得 GIS 技术不能充分发挥其强大的空间分析功能和可视化表达优势^[62]。由此可见,GIS 技术和 InSAR 及 D-InSAR 技术的融合有待进一步的研究。

尽管遥感监测技术在实际的监测中表现出以上多种不足,但是,随着科技的迅猛发展,这些不足和局限将会在更先进的遥感技术中得以克服,届时,遥感技术在矿区沉陷监测中的潜力会得到更大的发挥。

4 RS 技术在矿区地表沉陷监测中应用展望

世界各国经济的高速发展,使得人们对不可再生矿产资源的需求持续上升,而煤炭依旧是世界各国主要能源,大规模煤炭资源的开采不可避免。而随着人类对煤矿开采深度的不断加深,开采范围不断向村庄、城镇、交通干线等区域延伸,必将会产生更大范围、更强破坏力的地面沉陷^[13]。为了环境、社会、经济的可持续发展,我们必须采取更加先进的技术和方法监测、预测和分析矿区地表沉陷^[63]。现今,InSAR、D-InSAR、PS-InSAR 等 RS 监测技术在矿区塌陷监测中已表现出了强大的优越性,和十分乐观的发展前景。尽管这些 RS 技术在实际应用中还具有一些不足和局限之处,但随着 RS 技术的迅速发展,传感器性能的提高,多时相、多数据源、多极化的组合会使得 RS 技术在矿区沉陷监测中得到广泛的应用。此外,以水准测量、GPS 测量为补充的 RS 监测技术再结合 GIS 技术强大的空间分析能力和表达优势,可用以共同描述和预测矿区地表沉陷发展态势,RS 和 GIS 技术的融合将会成为矿区地表沉陷 RS 监测的新的发展方向。

参考文献

- [1]张阿根,杨天亮.国际地面沉陷研究最新进展综述[J].上海地质,2010,31(4):57-63.
- [2]常占强,宫辉力.矿区地面沉陷预计方法与应用前景分析[J].地球信息科学学报,2011,13(2):151-156.
- [3]Thompson J A, Lamb D W, Frazier P S, et al. Monitoring the ef-

- fects of longwall mine-induced subsidence on vineyards[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(5): 973-984.
- [4] Malgot J, Baliak F. Influence of underground coal mining on the environment in horna nitra deposits in slovakia[J]. Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe, 2004: 694-700.
- [5] Can E, Ku?cu ?, Mekik C. Determination of underground mining induced displacements using GPS observations in Zonguldak-Kozlu Hard Coal Basin[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 89: 62-69.
- [6] Can E, Mekik ?, Ku?cu ?, et al. Monitoring deformations on engineering structures in Kozlu Hard Coal Basin [J]. Natural Hazards, 2013, 65(3): 2311-2330.
- [7] Düzgün H S, Demirel N. Remote sensing of the mine environment [M]. CRC Press LLC, 2011.
- [8] Horn M, Cass P, Bazan-Zurita E. Mitigation and Monitoring of Structural Distress in the Whately Electrical Substation Due to Mine Subsidence [C]//Electrical Transmission and Substation Structures 2012@ sSolutions to Building the Grid of Tomorrow. ASCE, 2012: 132-143.
- [9] Altun A O, Yilmaz I, Yildirim M. A short review on the surficial impacts of underground mining [J]. Sci Res Essays, 2010, 5(21): 3206-3212.
- [10] Lokhande R D, Prakash A, Singh K B, et al. Subsidence control measures in coalmines: A review[J]. Journal of scientific & industrial research, 2005, 64: 323-332.
- [11] Can E, Mekik C, Ku?cu S, et al. Subsidence occurring in mining regions and a case study of Zonguldak-Kozlu Basin [J]. Sci Res Essays, 2011, 6(6): 1317-1327.
- [12] 宁树正, 万余庆, 孙顺新. 煤矿区沉陷与遥感监测方法探讨 [J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(1): 10-12.
- [13] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 基于 D-InSAR 的煤矿区开采沉陷遥感监测技术分析[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 22-25.
- [14] Raucoules D, Colesanti C, Carnec C. Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2007, 339(5): 289-302.
- [15] 刘广, 郭华东, 李新武, 等. InSAR 技术在矿区沉陷监测中的应用研究[J]. 国土资源遥感, 2008, 2: 51-55.
- [16] Zhao Y. Principles and Methods for Remote Sensing Application and Analysis[J]. Beijing: Science Press, 2003: 413-416.
- [17] Ge L, Rizos C, Han S, et al. Mining subsidence monitoring using the combined InSAR and GPS approach[J]. Proc. 10th FIG Sym. Def. Measur., Orange, California, USA, 2001: 19-22.
- [18] 张帝, 高雅萍, 许双安. GPS 技术在矿区沉陷监测中的应用 [J]. 测绘信息与工程, 2010, 37(2): 22-24.
- [19] 刘伟科, 刘国林, 张晓庆. 雷达干涉测量技术在矿区形变监测中的应用研究[J]. 地矿测绘, 2012, 28(01): 1-4.
- [20] 刘欢欢. PSInSAR 在地面沉陷监测中的研究分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [21] 侯建国, 杨成生, 王亚男, 等. 煤矿开采沉陷监测--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): 71-72.
- [22] 刘国祥, 丁晓利, 黄丁发. Monitoring Crustal Deformations with Radar Interferometry: A Review[J]. 西南交通大学学报, 2004, 12(2).
- [23] Chatterjee R S, Fruneau B, Rudant J P, et al. Subsidence of Kolkata (Calcutta) city, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique [J]. Remote sensing of environment, 2006, 102(1): 176-185.
- [24] Marghany M. DInSAR technique for three-dimensional coastal spit simulation from radarsat-1 fine mode data [J]. Acta Geophysica, 2013, 61(2): 478-493.
- [25] Ismaya F, Donovan J. Applications of DInSAR for Measuring Mine-Induced Subsidence and Constraining Ground Deformation Model [C]//GeoCongress 2012@ sState of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. ASCE, 2012: 3001-3010.
- [26] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1986, 91 (B5): 4993-4999.
- [27] Perski Z, Hanssen R, Wojcik A, et al. InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland [J]. Engineering Geology, 2009, 106(1): 58-67.
- [28] Perski Z, Hanssen R. The interpretation of Bam fault kinematics using ENVISAT SAR interferometric data[C]//Fringe 2005 Workshop, 2006, 610: 63.
- [29] 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.
- [30] 程晓, 李小文, 邵芸等. 南极格罗夫山地区冰川运动规律 DIN-SAR 遥感研究[J]. 科学通报, 2006, 22(5): 571-574.
- [31] Marschalko M, Yilmaz I, Bedn?rik M, et al. Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujala and Staric case studies from Czech Republic[J]. Engineering Geology, 2012.
- [32] XunChun W, Yue Z, XingGe J, et al. A Dynamic Prediction Method of Deep Mining Subsidence Combines D-InSAR Technique [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 2533-2539.
- [33] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(8): 664-668.
- [34] 朱建军, 邢学敏, 胡俊, 等. 利用 InSAR 技术监测矿区地表形变[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2564-2576.
- [35] 邢学敏. CRInSAR 与 PSInSAR 联合监测矿区时序地表形变研究[D]. 中南大学, 2011.
- [36] 侯安业, 张景发, 刘斌, 等. PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 监测地表沉陷的比较研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(4): 125-128.
- [37] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2001, 39(1): 8-20.
- [38] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential

- SAR interferograms [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [39] 邢学敏, 丁晓利, 朱建军, 等. CRInSAR 与 PSInSAR 联合探测区域线性沉陷研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(5): 1193-1204.
- [40] 王珊珊, 季民, 胡瑞林, 等. 基于 InSAR-GIS 的矿区地面沉陷动态分析平台的实现与应用 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37 (A02): 307-312.
- [41] Zhang H M, Gao Y. The Dynamic Monitoring of Coal Mining Seeper Subsidence District Based on RS and GIS Technology -A Case Study of Huainan City [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 256: 2311-2314.
- [42] 黄宝伟, 宋小刚, 王振杰, 等. 基于 D-InSAR 技术的葛亭煤矿地面沉陷监测研究[J]. *工程勘察*, 2012, 40(4): 55-60.
- [43] Tomás R, Romero R, Mulas J, et al. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013: 1-19.
- [44] 盛耀彬. 基于时序 SAR 影像的地下资源开采导致的地表形变监测方法与应用[D]. 中国矿业大学, 2011.
- [45] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉陷 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.
- [46] 闫大鹏. 基于 D-InSAR 技术监测云驾岭煤矿区开采沉陷的应用研究[D]. 中国地质大学 (北京), 2011.
- [47] Ge L, Rizos C, Han S, et al. Mining subsidence monitoring using the combined InSAR and GPS approach [J]. *Proc. 10th FIG Sym. Def. Measur., Orange, California, USA*, 2001: 19-22.
- [48] Ge L, Chang H C, Janssen V, et al. Integration of GPS, radar interferometry and GIS for ground deformation monitoring[C]//*Proc. 2003 Int. Symp. on GPS/GNSS, Toyko, Japan, 15-18 November 2003*. 2003: 465-472.
- [49] Ge L, Chang H, Rizos C. Mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(3): 259.
- [50] Baek J, Kim S W, Park H J, et al. Analysis of ground subsidence in coal mining area using SAR interferometry [J]. *Geosciences Journal*, 2008, 12(3): 277-284.
- [51] Herrera G, Tomás R, Vicente F, et al. Mapping ground movements in open pit mining areas using differential SAR interferometry [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(7): 1114-1125.
- [52] 李学军. InSAR 技术在大同矿区地面沉陷监测中的应用研究[D][D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [53] 张勤, 赵超英, 丁晓利, 等. 利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉陷与地裂缝时空演化特征 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1214-1222.
- [54] 余景波, 刘国林, 曹振坦. 差分干涉测量 (D-InSAR) 技术在矿区地面沉陷监测中的应用 [J]. *全球定位系统*, 2010, 35 (005): 54-60.
- [55] 陶秋香, 刘国林, 刘伟科. L 和 C 波段雷达干涉数据矿区地面沉陷监测能力分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3681-3689.
- [56] 刘金龙, 郭华东, 宋瑞. 多模式雷达在矿区沉陷监测中的应用研究[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(4): 584-590.
- [57] 胡俊, 李志伟, 朱建军, 等. 基于 BFGS 法融合 InSAR 和 GPS 技术监测地表三维形变[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1).
- [58] 刘国祥. 利用雷达干涉技术监测区域地表形变[J]. 2006.
- [59] Hu Z, Xu X, Zhao Y. Dynamic monitoring of land subsidence in mining area from multi-source remote-sensing data—a case study at Yanzhou, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(17): 5528-5545.
- [60] 刘欢欢, 范景辉, 陈建平, 等. 基于相位空间相关性分析的 PSInSAR 技术在地面沉陷监测中的研究与实践[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(003): 15-19.
- [61] 许才军, 王华. InSAR 相位解缠算法比较及误差分析[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2004, 29(1): 67-71.
- [62] 王珊珊, 季民, 胡瑞林, 等. 基于 InSAR-GIS 的矿区地面沉陷动态分析平台的实现与应用 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37 (A02): 307-312.
- [63] 余景波, 刘国林, 曹振坦. 差分干涉测量 (D-InSAR) 技术在矿区地面沉陷监测中的应用 [J]. *全球定位系统*, 2010, 35 (005): 54-60.
- [64] Dong L, NanShan Z, Gang W. Land Subsidence Monitoring in Mining Area with the Application of GPS and D-InSAR [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011, 4: 033.

(上接第 14 页)

- 堵塞原因分析及对策[J]. *华电技术*, 2011, 11(33): 69-73.
- [13] 姚东民. 烟气脱硫系统除雾器损坏原因分析及处理措施[J]. *河北电力技术*, 2012, 5(31): 43-44.
- [14] 谭学谦. 浅谈 600MW 机组湿法脱硫吸收塔的设计[J]. *电力环境保护*, 2007, 3(23): 32-35.
- [15] 郑桂波, 黄绮锋. 600MW 机组烟气湿法脱硫装置吸收塔除雾器改造及效果分析 [J]. *水电与新能源*, 2012, 4: 76-78.
- [16] 姚杰, 仲兆平, 周山明. 湿法烟气脱硫带钩波纹板除雾器结构优化数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 14(30): 61-67.
- [17] 王大勇, 李彩亭, 曾光明, 等. 伞罩型除尘脱硫塔内除雾器性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, 3(30): 13-16.
- [18] 李鑫. 湿式静电除雾器在建材工业用锅炉脱硫上的应用[J]. *新材料与应用*, 2011, 8: 98-100.
- [19] Staehle R, Triscori R J, Kumar K S, et al. The Past, Present, and Future of Wet Electrostatic Precipitators in Power Plant Applications [J]. *Mega Symposium*, May. 2003: 19-22.