

京津城际铁路沿线不均匀地面沉降演化特征

段光耀¹ 刘欢欢² 宫辉力³ 陈蓓蓓³

1 天津城建大学地质与测绘学院,天津,300384
2 北京市地质研究所,北京,100120
3 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京,100048

摘 要:北京-天津(京津)城际铁路经过地面沉降漏斗边缘,其安全运营随着不均匀沉降的增加而威胁增加。采用时序干涉测量技术监测铁路沿线地表形变,结合剖面分析与时序分析方法探讨其与影响因素之间的响应特征,揭示铁路沿线不均匀地面沉降空间分布与演化特征。结果表明,梯度可以很好地体现区域地面沉降不均匀性,研究区可压缩层厚度、地下水开发利用情况、铁路运行等均与地面沉降呈现正相关关系。可压缩层的存在为沉降发生的基础条件,地下水开发利用与铁路运营为沉降产生的主导条件,二者的时空分布情况共同决定不均匀地面沉降的发展演化。

关键词:京津城际铁路;不均匀地面沉降;合成孔径雷达影像干涉;梯度
中图法分类号:P237.9 **文献标志码:**A

高速铁路对桥梁的稳定性与轨道的平顺性有非常严格的要求。不均匀地面沉降可改变铁路线坡度,严重威胁高速铁路的安全运营。对铁路沿线地面沉降的监测和分析是保证列车安全运行的最重要任务之一。

针对该问题,国内外学者系统研究了区域不均匀地面沉降对铁路安全运行产生的危害,在利用合成孔径雷达影像干涉(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)获取铁路沿线区域地表形变^[1-5],分析铁路沿线不均匀沉降分布情况^[6],构建系统的监测体系^[7]等方面进行了深入研究,包括深入分析地面沉降成因,讨论不同桩基基础、地下水开采等对地面沉降的影响^[8-9]等。研究发现地下水降深越大,引起的变形占设计荷载引起变形的比例越大^[10]。

2008 年以来,中国开通了一系列的高速铁路,其中包括北京-天津城际铁路(京津城际)。前人的研究为深入探究京津城际不均匀地面沉降的演化特征提供了宝贵的经验。本文以城铁北京段的历史形变资料、地下水开采和水文地质条件为基础,结合传统的监测手段(水准和分层标技术)和 InSAR 技术,采用 GIS 空间分析等方法开展区域不均匀地面沉降研究,以梯度分析、断面分析及时间序列分析等手段来探究铁路沿线不均匀地面沉降和铁路之间的时空演化特征关系。

1 铁路沿线地面沉降监测

京津城铁北京段主要穿越朝阳区和通州区,途经东八里庄-大郊亭沉降中心与梨园-台湖沉降中心边缘。1955~2007 年,东八里庄-大郊亭沉降中心的总沉降量可达 800 mm,梨园-台湖沉降中心可达 600 mm^[11]。东八里庄-大郊亭沉降漏斗逐渐东移,管庄、三间房、台湖等成为潜在的沉降发展区域。沉降中心附近沉降速率呈逐渐增大趋势,通州台湖地区 2007 年最大年沉降量约 93 mm,2012 年已超过 150 mm^[12]。实际上,铁路设计和施工时已认真考虑该区域沉降情况,并尽量远离沉降中心,但受实际情况限制,部分路段距离沉降中心边缘距离仍仅为 4~5 km。且在沉降中心的边缘形变速率也非常大,这样的区域更易产生不均匀沉降,对于线性工程的影响可能更大。此外,铁路沿线软土区段地下水的持续性过量开采与累积沉降加大,也使铁路安全运行受到潜在威胁。

本文选取 2003~2010 年间覆盖研究区的 36

景 ASAR(Advanced Synthetic Aperture Radar)影像,采用 StaMPS(Stanford Method for Persistent Scatterers)方法获取研究区地表形变信息。

以 2007 年二等水准等值线和 10 个二等水准点作为真值,验证 InSAR 结果的可靠性。从图 1 可以看出,InSAR 结果与水准等值线吻合较好。水准点与附近 PS 点均值的最大绝对误差为 4.25 mm,最小绝对误差为 0.08 mm,几个水准点的标准误差为 2.37 mm,反映出 InSAR 结果较高的精度。

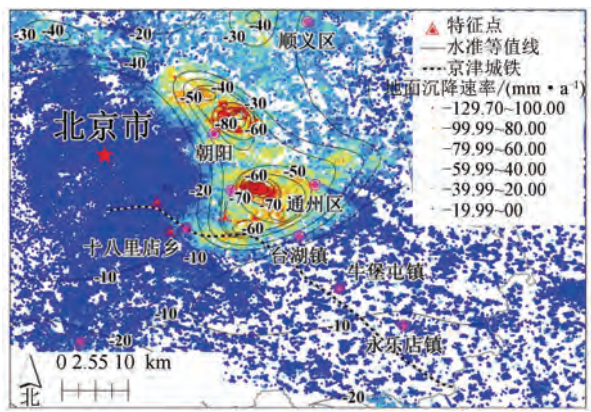


图 1 京津城铁沿线 2007 年 InSAR 形变监测结果
Fig.1 InSAR Result Along BJ-TJ Inter-City Railway

由图 1 可知,最严重的沉降中心之一位于铁路附近,其 2007 年的沉降量在 -100 mm 以上。铁路沿线 2004~2009 年间年均沉降速率在 $0\sim-80\text{ mm/a}$ 之间。

2 铁路沿线地面沉降成因

铁路沿线地面沉降成因较为复杂,地下水位变化、地下水开采、可压缩层等都可能影响地面沉降发展^[13]。

2.1 地下水位变化对不均匀地面沉降影响程度

针对京津城铁沿线区域地下水位的时序变化(图 2),研究其对地面沉降的影响。

在 1965~2005 年间,北京地下水流场发生了较大的变化,在朝阳区王四营附近形成地下水降落漏斗。在此期间,地下水流场降深差异性明显,最大降深达 30 余米,地下水漏斗附近水力梯度逐年变大,较易产生不均匀地面沉降。地下水漏斗与沉降中心空间分布较为吻合。

王四营地面沉降监测站距离京津城际铁路仅有 4.6 km,对于分析铁路沿线地面沉降特征意义重大。本文收集 2004~2012 年该站地下水位变化数据,提取附近 2004~2010 年 InSAR 监测成果(图 3)。

王四营地面沉降监测站位于永定河冲积扇,

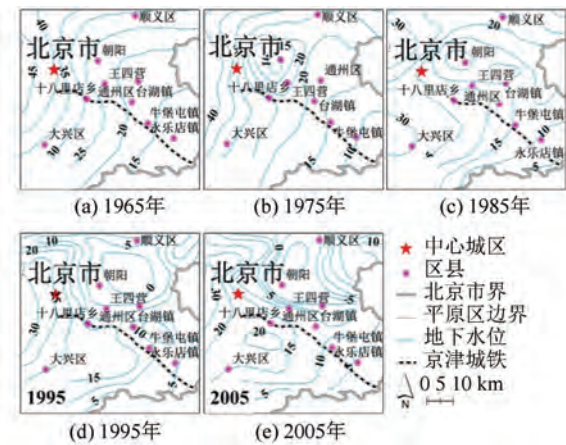


图 2 1965-2005 年京津城铁沿线地下水位^[14]
Fig.2 Groundwater Level Along BJ-TJ Inter-City Railway from 1965 to 2005^[14]

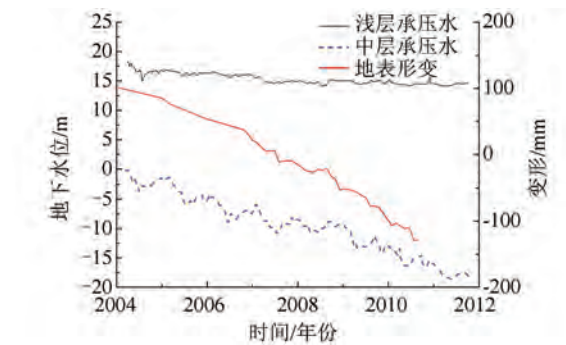


图 3 王四营地面沉降监测站承压水位变化与 InSAR 监测时序地表形变^[15]
Fig.3 Groundwater Level Fluctuation at Wangsiying Subsidence Monitoring Station and Time-Series Subsidence by InSAR Technique^[15]

其浅层承压水埋深为 $35\sim100\text{ m}$,中层承压水的埋深为 $100\sim150\text{ m}$ ^[16]。中层承压水位呈现长期持续下降和季节性回弹的特征,地面沉降速率在这期间呈现加速下降趋势。地面沉降曲线与地下水位曲线具有很好的对应关系,特别是与中层承压水的变化趋势基本一致。

总体而言,研究区地下水位阶段性不均匀下降,并伴随不同的发展演化特点。一些地区有相当大的地下水水位梯度,加速了不均匀沉降,对线性工程的影响巨大。

2.2 地下水开采量与地面沉降响应关系
地下水的过量开采是造成地面沉降的主要因素之一。京津城铁沿线地面沉降最为严重的地段,地下水长期处于过量开采。1991 年、2000 年和 2003 年地下水开采情况如图 4 所示。

开采强度为地下水开采量与可开采资源总量的比值。当这一比值小于 100% 时,表示未过度开采;比值位于 100%~120% 间,表示过度开采;

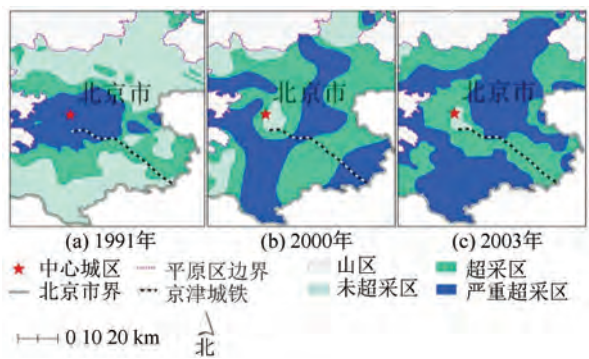


图 4 京津城际铁路沿线地下水开采情况^[17]

Fig.4 Groundwater Exploitation Along
BJ-TJ Inter-City Railway^[17]

在 120% 以上则表示严重过度开采。

1991~2003 年地下水过度开采区域面积逐渐增加。1991 年,严重超采区主要分布在北京主城区,其他地区无严重超采情况。2000 年前后,主城区开始实行政策性限采,严重超采区从主城区向外延伸,形成环状结构,仅有主城区中央地带和一些边远地区未超采。2003 年,除中心城区外,平原区大部分区域无法满足地下水补给与开采之间的平衡,处于严重超采状态。

在地下水开采的时间演化上,京津城铁附近地下水超采变化较大,从 1991 年京津城铁北京南站超采严重,其他路段普通超采,逐渐演化为京津城铁沿线普遍超采,部分地区严重超采。尤其是距离北京南站 12 km 处,随着时间推移,均处于严重超采状态,而此处也是地面沉降速率一直较大的区域。前期地下水持续超采对后续地面沉降发生有长时间的滞后影响。本文认为,长期持续过度抽取地下水是导致地下水位下降及地面沉降加速发展的主要因素。因此,必须采取一定的措施,限制京津城铁沿线沉降区地下水的开采。

2.3 可压缩层厚度对地面沉降的影响

京津城铁沿线部分区域,100 m 以内的晚更新世粘土可压缩层占主导地位,分布多层交叠砂砾石、砂、粉细、砂,层间以粘土层构成的孔隙含水岩组。随着地下水位的下降,粘性土含水层孔隙水压力减小,土壤中有效应力的增加导致形变的发生。京津城铁主要穿过永定河冲积扇底部,因此部分路段地面沉降受到粘土可压缩层分布不均的影响。

京津城铁沿线可压缩层厚度的比例变化显著。在北京段京津城铁的始端和末端,可压缩层厚度不超过 50%;而京津城铁的中段部分(图 5 中 A、B 区域),可压缩层超过 60%。然而,两个

区域垂直形变速率和累积形变量有显著差异。A 区地下水位更低,开采量更大,其沉降远远超过 B 区。可知对于地面沉降来说,可压缩层是一个必要不充分条件。具有较厚可压缩土层的区域,只有同时具有较低地下水位时才会出现更大地表形变。

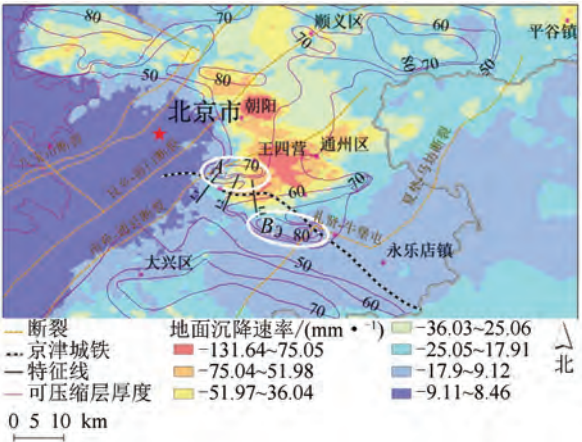


图 5 铁路沿线 100 m 以内可压缩层厚度分布

Fig.5 Compressible Layer Thickness Along
the Railway Within 100 m Depth

3 地面沉降对铁路的影响

地面沉降的发展在北京已经造成了一定的建筑破坏和基础交通线路沉降。铁路沿线不均匀沉降会改变轨道梯度,影响铁路的平滑度和列车的运行安全。新开通的高速铁路在这方面有非常严格的要求,包括轨道路基的总变形量、轨道平滑度和平整度等。因此,非常有必要分析沉降现状和发展趋势及其对铁路的影响。

根据中国高速铁路标准,当某铁路限速为 350 km/h 时,其最小形变曲率半径是 49 000 m^[15]。相邻像素的形变差可以通过沉降速率图和梯度图进行比较。根据上述思路,本文采用沉降梯度来描述线性交通的不均匀沉降,以曲率半径作为对沉降梯度最大区段的限制依据:

$$r = 0.5 [(L/2)^2 + \Delta h^2] / \Delta h \tag{1}$$

式中, r 是曲率半径; L 是沉降点距离; Δh 是沉降点间的差异沉降量。

在生成沉降速率图后,沉降梯度图也可以计算出来。速率梯度通过沉降速率在垂直方向和水平方向的变化来得到,以中心像素到它的邻近像素的比值来确定:

$$G = \arctan(\sqrt{(d_z/d_x)^2 + (d_z/d_y)^2}) \tag{2}$$

式中, G 是沉降梯度; d_x 是沉降点在 x 方向上的

距离; d_y 是沉降点在 y 方向上的距离; d_z 是沉降点间的差异沉降量。

沿铁路构建一条 3 km 的缓冲区,其沉降速率和沉降梯度图如图 6 所示。

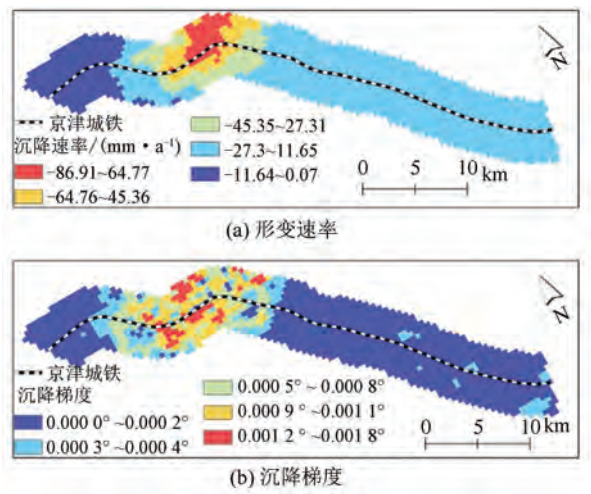


图 6 铁路沿线形变速率与沉降梯度

Fig.6 Subsidence Rate and Subsidence Gradient

图 6(a)用红色表示沉降速率较大区域,图 6(b)用红色表示沉降速率梯度较大的区域,两幅图的红色区域分布有一定的差异。假设所有地区都以同一恒定的速率发生沉降,建筑物和线性工程将不会受到均匀沉降的影响。而不均匀地面沉降则易对工程建设产生影响,特别是对地面和地下线性公共交通线路、管道等。不均匀沉降通常不会发生在沉降中心或非沉降的区域,而是发生在沉降漏斗的边缘区域。且由于在沉降中心主要产生压应力,而在沉降中心边缘地区主要产生拉应力,故在沉降边缘区更易产生地裂缝等次生地质灾害。因此高铁沿线沉降速率较高和沉降梯度较大的区段都应受到重视。

沉降速率断面图和铁路沿线梯度断面图可以在一定程度上反映沉降曲率半径,如图 7 所示。

图 7(a)显示,在铁路的始端和末端没有明显的形变,沉降速率小于 -10 mm/a ,而在距离铁路始端大概 $16\ 000\text{ m}$ 处产生波谷,显示出与两端沉降速率的巨大差异。在 10 年内,就京津城际北京段而言,这种差异至少会累积形成 0.5 m 的差异沉降。图 7(b)显示多个波峰和波谷,反映沉降梯度变化。在距始端 $11\ 000\text{ m}$ 和 $14\ 000\text{ m}$ 处有两个突出波峰,为铁路沿线的最大差异形变。梯度反映的是标高变化和水平距离之间的关系,体现形变对地表坡度角的改变程度。形变图和梯度图上的像素大小为 400 m ,因此, 400 m 范围内,最大峰值 $0.001\ 5$ 对应于每年 10 mm 的垂直形变差

异。据此可得在监测期间其最大沉降差异为 60 mm 。由式(1)可知,曲率半径为 $5\ 555\ 556\text{ m}$,远大于 $49\ 000\text{ m}$ 。

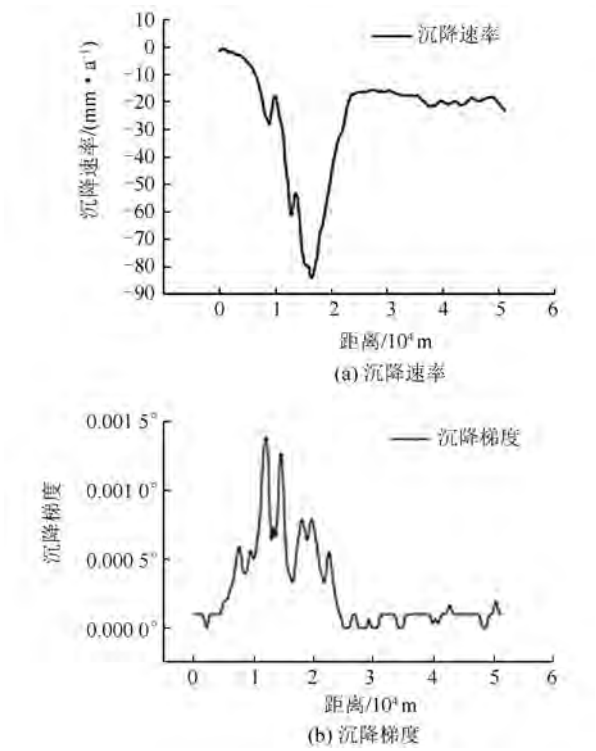


图 7 2004~2010 年铁路沿线沉降速率与梯度断面图
Fig.7 Subsidence Rate and Gradient Profiles Along the Railway, from 2004 to 2010

地面沉降的发展仍是铁路运营的潜在威胁。分析铁路沿线地面沉降速率随时间的变化情况,如图 8 所示。

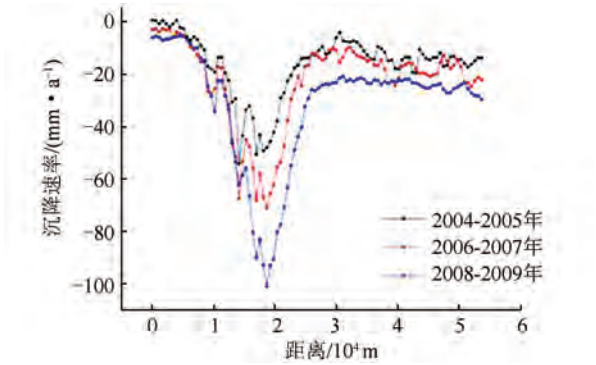


图 8 铁路沿线沉降速率时序图
Fig.8 Time-Series Subsidence Rate

根据图 8,铁路沿线 2004~2005 年期间地面沉降速率最大处达到 -50 mm/a ,2006~2007 年期间地面沉降速率最大处达到 -70 mm/a ,2008~2009 年期间地面沉降速率最大处达到 -100 mm/a 左右。随着时间推移,地面沉降速率逐渐增大,铁路沿线整体沉降情况及其不均匀程度均呈加速变化,二者的曲率半径也呈加速减小趋势。

从图 5 中提取 3 条横跨铁路的 7~8 km 长的沉降速率剖面(图 9),用来确定铁路经过的线性区域是否比两侧的沉降更严重,即铁路动载荷对地面沉降是否有影响。

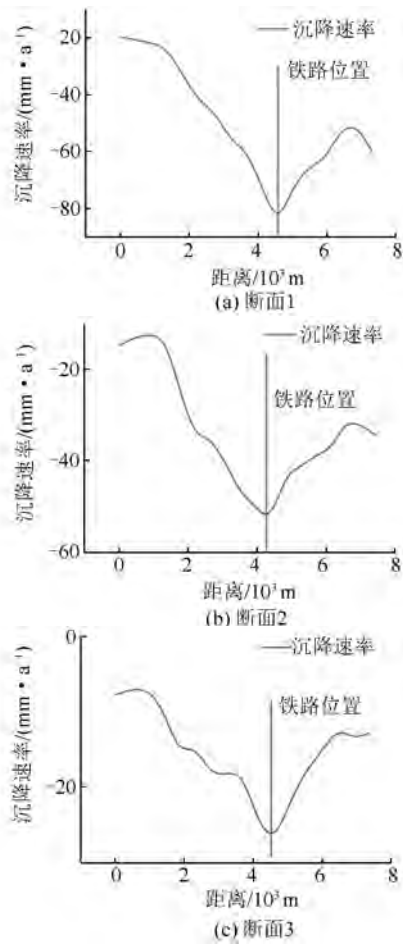


图 9 3 条跨越铁路的地面沉降速率断面
Fig.9 Subsidence Rate Profiles Across the Railway

3 条线均位于铁路的中段,在东八里庄一大郊亭沉降中心的西南边缘地区。断面 1 穿越了东八里庄一大郊亭沉降中心的边缘,靠近沉降中心时沉降速率有增大的趋势,垂直速度变化范围为-20~-80 mm/a;在距离 4 200 m 处也有明显的波谷,这与铁路的位置是相一致的。断面 2 和断面 3 更接近市中心,靠近城际铁路的始端;与断面 1 相比,二者具有相对小的变化范围,从-5~-50 mm/a,铁路处于剖面线的波谷位置,沉降速率分别为-45 mm/a 和-25 mm/a。尽管 3 条剖面的沉降速率范围不同,但在靠近铁路时都表现出最高的垂直沉降速度,在远离铁路时速率越来越低。

从以上 3 条线可以看出,铁路附近的沉降速率较两侧更大。尽管开采地下水对于地面沉降的影响最大,由铁路所产生的动载荷也会影响地面

沉降的发展。
为了更好地研究铁路沿线形变历史,以 InSAR 技术获取的 3 个点(图 1)形变历史(图 10)来反映铁路中段的地面沉降情况。

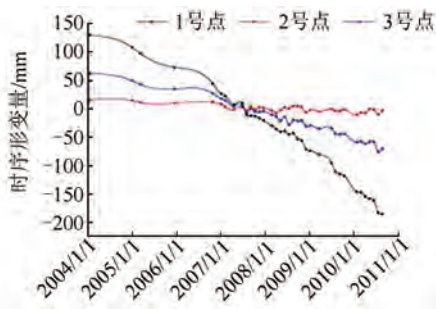


图 10 3 个点监测时段内的形变过程
Fig.10 Time-Series Subsidence of Three Points

1 号点位于沉降漏斗的边缘,其他点都位于沉降漏斗外。1 号点在 7 年间垂直沉降量超过 300 mm,沉降速率自 2009 年以来也呈增长趋势。它所在地区的地下水开采量很大,且具有较厚的可压缩粘土层。2 号点是距离中心城区最近的点,形变速率最低,在整个 7 年监测期内的总高差变化小于 30 mm。3 号点在整个监测期内具有与 2 号点类似的沉降趋势,其点位从 50~-50 mm,总形变量在 100 mm 左右。

4 结 语

京津城际铁路各区段有不同的基础地质背景、地下水位和地下水开采量,地下水位、地下水开采量与地面沉降的分布情况呈明显空间正相关,而可压缩层厚度与地面沉降分布也呈现一定的相关性。在可压缩层厚度一定的情况下,地下水开采量越大,地下水位越低,地面沉降越严重。可压缩层为地面沉降的产生提供环境,而地下水开采则为其提供动力,二者共同影响地面沉降发展。InSAR 监测显示,随着时间的推移,沉降速率、累积地面沉降量、沉降不均匀程度均呈增加趋势,导致铁路沿线坡度加速变化,随着时间的累积,将对列车的安全运行产生威胁。另外,研究显示铁路沿线地面变形亦受铁路运行动载荷影响,主要表现为京津高铁沿线不均匀沉降较为明显,高铁两侧与铁路中心线呈现“凹”字形。

总体来看,区域不均匀沉降具有高复杂性、局部化与快速发展等特征,应引起足够的重视。有必要对铁路沿线地面沉降进行持续监测,制定相关措施防止不均匀地面沉降的快速发展和扩展。

参 考 文 献

- [1] Ge D Q, Wang Y, Xia Y, et al. Land Subsidence Investigation Along Railway Using Permanent Scatterers SAR Interferometry [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA, 2008
- [2] Luo Q, Perissin D, Lin H, et al. Railway Subsidence Monitoring by High Resolution InSAR Time Series Analysis in Tianjin [C]. International Conference on Geoinformatics, Shanghai, China, 2011
- [3] Li Yongsheng, Zhang Jingfa, Li Zhenhong, et al. Land Subsidence in Beijing City from InSAR Time Series Analysis with Small Baseline Subset [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11): 1 374-1 377 (李永生, 张景发, 李振洪, 等. 利用短基线集干涉测量时序分析方法监测北京市地面沉降[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11): 1 374-1 377)
- [4] Luo Sanming, Du Kaifu, Wan Wenni, et al. Ground Subsidence Rate Inversion of Large Temporal and Spatial Scales Based on Extended PSInSAR Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(9): 1 128-1 134 (罗三明, 杜凯夫, 万文妮, 等. 利用 PSInSAR 方法反演大时空尺度地表沉降速率[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(9): 1 128-1 134)
- [5] Zhu Feng, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Identification of Uneven Land Subsidence Segment Based on the InSAR and Wavelet Transformation: A Case Study of Beijing Section of Beijing-Tianjin High-Speed Railway [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(1): 23-27 (朱锋, 宫辉力, 李小娟, 等. 基于 InSAR 和小波变换的不均匀沉降段识别——以京津高铁北京段为例[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(1): 23-27)
- [6] Wang Rong, Yang Yan, Tian Fang, et al. Construction of a Monitoring System for Regional Land Subsidence Affecting High-Speed Railways [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2014, 35(2): 17-20 (王荣, 杨艳, 田芳, 等. 高速铁路区域地面沉降监测体系构建[J]. 上海国土资源, 2014, 35(2): 17-20)
- [7] Li Guohe, Sun Shuli, Xu Zailiang, et al. The Influence of Land Subsidence on the Bridge of High-Speed Railway and its Engineering Countermeasures [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008(4): 37-41 (李国和, 孙树礼, 许再良, 等. 地面沉降对高速铁路桥梁工程的影响及对策[J]. 铁道工程学报, 2008(4): 37-41)
- [8] Li Guohe, Jing Zhidong, Xu Zailiang. A Discussion of the Correlation Between Land Subsidence and Groundwater Level Variation Along the Jinghu High Speed Railway [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(6): 90-94 (李国和, 荆志东, 许再良. 京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 90-94)
- [9] Wang Rong, Yang Yan, Jia Sanman, et al. A Numerical Analysis of the Influence of Land Subsidence on the Engineering [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2014, 35(1): 64-67 (王荣, 杨艳, 贾三满, 等. 地面沉降对京津城际铁路工程稳定性影响的数值分析[J]. 上海国土资源, 2014, 35(1): 64-67)
- [10] Zhang Y, Gong H, Gu Z, et al. Characterization of Land Subsidence Induced by Groundwater Withdrawals in the Plain of Beijing City, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(2): 397-409
- [11] Yang Yan, Yang Hongjun, Wang Rong, et al. Effect of Regional Subsidence on the Line Gradient of the Beijing-Tianjin Inter-City [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2014, 35(2): 13-16 (杨艳, 杨红军, 王荣, 等. 区域沉降对京津城际高铁北京段线路坡度影响分析[J]. 上海国土资源, 2014, 35(2): 13-16)
- [12] Liu G, Luo X, Chen Q, et al. Detecting Land Subsidence in Shanghai by PS-Networking SAR Interferometry [J]. *Sensors*, 2008, 8(8): 4 725-4 741
- [13] Dong Dianwei, Lin Pei, Yan Ying, et al. Optimum Design of Groundwater Level Monitoring Network of Beijing Plain [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(1): 10-19 (董殿伟, 林沛, 晏婴, 等. 北京平原地下水水位监测网优化[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 10-19)
- [14] Li Guohe, Xu Zailiang, Sun Shuli, et al. The Influence of Surface Subsidence on Construction of High-Speed Railway in North China Plain and its Countermeasures [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2007, 24(8): 7-12 (李国和, 许再良, 孙树礼, 等. 华北平原地面沉降对高速铁路的影响及其对策[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(8): 7-12)
- [15] Liu Yu, Ye Chao, Jia Sanman. Division of Water-Bearing Zones and Compressible Layers in Beijing's Land Subsidence Areas [J]. *City Geology*, 2007, 2(1): 10-15 (刘予, 叶超, 贾三满. 北京市平原地面沉降区含水岩组和可压缩层划分[J]. 城市地质, 2007, 2(1): 10-15)
- [16] Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing Geology and Mineral Resources Exploration and Development Bureau. Beijing Groundwater [M]. Beijing: China Land Press, 2008 (北京市地质矿产勘查开发局, 北京市水文地质工程地质大队. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版

社, 2008)

[17] Qi Biao, Yang Lizhong, He Yulong. The Influence of Land Subsidence to Beijing-Tianjin Inter-City Railway [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2010, 22(7):187-188(祁彪,杨立中,贺玉龙. 地面沉降对京津城际铁路影响初析[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(7):187-188)

Evolution Characteristics of Uneven Land Subsidence
Along Beijing-Tianjin Inter-City Railway

DUAN Guangyao¹ LIU Huanhuan² GONG Huili³ CHEN Beibei³

1 School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

2 Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China

3 Department of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: Beijing-Tianjin inter-city railway travels through the edge of land subsidence funnels. With the increase of uneven settlement, it becomes a threaten for the safe operation of the railway. Time series interferometry technology is used to obtain the surface deformation along the railway, and cross-section method is used to reveal the spatial distribution and evolution characteristics of uneven subsidence. The results show that the gradient can well reflect the regional uneven land subsidence, which has presented positive correlation with the thickness of compressible layers, groundwater pumping and the railway operation. Compression layers are the basic preconditions, while the groundwater exploitation and utilization and the railway operation are the main reasons for land subsidence. The spatial-temporal distribution of the two factors may jointly determine the evolution of the non-uniform land subsidence.

Key words: Beijing-Tianjin railway; uneven land subsidence; InSAR; gradient

First author: DUAN Guangyao, PhD, lecturer, specializes in the monitoring and mechanism of ground deformation. E-mail: duanguangyao06@163.com

Corresponding author: GONG Huili, PhD, professor. E-mail: gonghl@263.net

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41130744, 41171335, 41401492; the Natural Science Foundation of Tianjin City, No.16JCZDJC40400.