

doi: 10.12029/gc20160628

雷坤超, 罗勇, 陈蓓蓓, 等. 北京平原区地面沉降分布特征及影响因素 [J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2216–2225.

Lei Kunchao, Luo Yong, Chen Beibei, et al. Distribution characteristics and influence factors of land subsidence in Beijing area[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2216–2225(in Chinese with English abstract).

北京平原区地面沉降分布特征及影响因素

雷坤超¹ 罗勇¹ 陈蓓蓓² 郭高轩¹ 周毅¹

(1.北京市水文地质工程地质大队,北京 100195;2.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘要:地面沉降是北京平原区主要地质灾害之一。文中采用永久散射体差分干涉测量(PS-InSAR)技术获取平原区地面沉降空间分布特征,基于GIS空间分析平台,将多种地面沉降影响因素分别与PS-InSAR获取的地面沉降场形变信息进行耦合研究,查明地面沉降与多种影响因素之间的响应关系。研究发现:(1)北京市地面沉降发育较为严重的地区主要出现在平原区东部、北部以及南部等地,存在多个沉降中心,最大沉降速率达到152mm/a,区域不均匀沉降现象明显,并且有连成一片的趋势。(2)地面沉降分布具有明显的构造控制特性,沉降区多位于几大活动断裂交接部位的沉积凹陷地区,与第四纪沉积凹陷十分吻合。地面沉降的发展趋势与活动断裂的走向具有明显的对应关系,在有活动断裂通过的区域,地面沉降剖面线上表现出明显的转折或突变,断裂两侧区域不均匀沉降十分明显。(3)地面沉降分层沉降量与对应层位上黏性土占比呈正比例关系,其空间分布特征及变化趋势与平原区的地层结构及可压缩黏性土层厚度具有很好的一致性,沉降范围整体由北西向的单一结构区向南东方向的多层结构区扩张。沉降速率大于50 mm/a的沉降区大多分布在黏性土层厚度大于100 m的地区,几大沉降中心与黏性土层厚度较大地区吻合较好。(4)第二承压含水层(顶底板埋深100~180 m)地下水开采对地面沉降影响最大,沉降中心与该层位地下水水位降落漏斗区高度吻合,是地面沉降的主要贡献层位。

关键词:地面沉降;PS-InSAR;GIS;基底构造;地下水;影响因素

中图分类号:P642.26 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)06-2216-13

Distribution characteristics and influence factors of land subsidence in Beijing area

LEI Kun-chao¹, LUO Yong¹, CHEN Bei-bei², GUO Gao-xuan¹, ZHOU Yi¹

(1. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing, 100195, China; 2. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

Abstract: Land subsidence is one of the main geological disasters in Beijing area. In this study, the authors investigated the spatial distribution characteristics of land subsidence in Beijing area by using the permanent scatter interferometric synthetic aperture radar

收稿日期:2015-11-11; 改回日期:2016-04-24

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41401492/D010702)、北京市自然科学基金(Z131100005613022)、基于北斗卫星的地面沉降监测(1212011220184)和北京市地面沉降监测系统年运行费项目(PXM2016_158305_000004)联合资助。

作者简介:雷坤超,男,1986年生,硕士,工程师,长期从事地面沉降与地裂缝监测研究工作;E-mail:leikunchao123@126.com。

通讯作者:陈蓓蓓,女,1985年生,博士,副教授,主要从事地面沉降InSAR监测及相关研究工作;E-mail:applechenbeibei@126.com。

(PS-InSAR) technique and studied the relationship between the multiple factors of land subsidence and the deformation obtained by PS-InSAR on the GIS spatial analysis platform. Some conclusions have been reached: (1) The land subsidence in Beijing area mainly occurs in the east, north and south of the plain, where there are multiple settlement centers, with the maximum settlement rate reaching 152mm/a. The regional uneven subsidence areas are obvious, and there is a trend that these areas are connected with each other to form a complete subsidence region. (2) The distribution of land subsidence areas is controlled by structures; the subsidence area is mainly located in the area of the sedimentary depression formed by several major active faults, which is in agreement with features of the Quaternary deposit. There is an obvious corresponding relationship between the development trend of the land subsidence and the strike of active faults. In the area of active faults, the land subsidence section line shows obvious turning or abrupt change, and the uneven subsidence on the two sides of the fault is very obvious. The layered settlement is directly proportional to the cohesive soil in the corresponding layer. The spatial distribution of the land subsidence has a good agreement with the stratigraphic structure and the thickness of the compressible cohesive soil layers in Beijing area. The range of the land subsidence area expands from the northwest characterized by the single structural zones to the southeast characterized by the multi-structure zones. The areas where the settlement rate is more than 50 mm/a are mostly distributed in the area whose thickness of the compressible cohesive soil layers is more than 100 m. The settlement centers are in good agreement with the large thickness of the cohesive soil layers. (4) The second confined groundwater (top and bottom depth being 100~180 m) exploitation is the most influential factor responsible for the land subsidence, and the settlement centers are in agreement with the groundwater funnel.

Key words: land subsidence; PS-InSAR; GIS; basement structure; groundwater; affecting factors

About the first author: LEI Kun-chao, male, born in 1986, master, engineer, long engages in the study of land subsidence and ground fissure; E-mail: leikunchao123@126.com.

Found support: Supported by National Natural Science Foundation of China Youth Fund (No. 41401492/D010702), Beijing Natural Science Foundation (No. Z131100005613022), Based on the Beidou Satellite to monitor land subsidence (No. 1212011220184) Monitoring of Land Subsidence in Beijing (No. PXM2016_158305_000004).

1 引言

地面沉降是在自然和人为因素作用下,由于地表松散未固结土体压缩而导致的区域性地面高程降低的地质现象,是一种不可补偿的永久性环境和资源损失^[1]。据统计,目前世界上已有150多个国家和地区发生地面沉降,包括美国、日本、墨西哥、意大利等^[2]。地面沉降已经成为一个全球性的地质环境问题^[3-4]。北京是国际上为数不多的以地下水作为主要供水水源的特大型城市之一,其中2/3以上的用水取自地下,第四系孔隙水开采量占到全市地下水开采总量的90%以上,地下水资源长期处于超量开采状态,地面沉降日趋严重。

从已掌握的研究资料来看,北京市地面沉降最早发现于1935年西单至东单一带。20世纪50—60年代因工业发展大量开采地下水,形成了东郊地面沉降区。此后,北京市地面沉降经历了发展(1973—1983年)、扩展(1983—1999年)和快速发展(1999年至今)几个阶段^[5]。截至2013年,北京平原区累计沉降量超过50 mm的区域面积已达4300多km²,约占平原区总

面积的68%,最大累计沉降量达到1495 mm。

长期以来,有关北京市地面沉降发展过程和沉降特征的变形资料主要是通过大面积精密水准测量和少量分层标获得的。这些传统监测手段由于其自身的缺陷,往往很难准确定义出地面沉降区域的范围、形变幅度以及季节性形变特征^[6],并且存在数据缺失等现象,给地面沉降的分析工作带来较大困难。随着星载合成孔径雷达差分干涉测量(DInSAR)技术的问世及发展,以其实时动态、大范围、高精度的特点已经在地面沉降、火山运动、地震、冰川漂移等领域表现出巨大的应用潜力^[7]。2000年, Ferretti et al.^[8-9]首次提出永久散射体干涉测量技术(Permanent Scatterer for SAR Interferometry, PS-InSAR),该方法通过选取那些自身散射特性较强并且相位信息较为稳定的地面目标点作为地表形变信息的表征,可以有效克服DInSAR空间、时间失相干及大气延迟的影响,提高了地表形变的监测精度(达到毫米级),由此将城市地表形变InSAR监测研究推向高潮。同时,该项技术的发展也给水文地质工作者开展地面沉降成因

机理研究带来了全新的视角。此后,国内外众多专家、学者针对InSAR技术改进、地面沉降成因机理以及两者之间的学术交叉开展了一系列研究工作,取得大量研究成果^[10-17]。

本文利用覆盖北京平原区2011—2013年25景RadarSAT-2雷达卫星SAR影像数据进行永久散射体差分干涉处理,获取北京平原区地面沉降形变信息,查明地面沉降空间分布特征。同时,分别选取35个水准点和35个GPS点进行单点精度检验。在此基础上,采用GIS空间叠置分析技术,将地面沉降多种影响因素分别与PS-InSAR获取的地面沉降场形变信息进行耦合研究,查明地面沉降与多种影响因素之间的响应关系,为今后地面沉降模型的建立和沉降防治工作的顺利开展奠定基础。

2 研究区概况

北京市位于华北平原西北边缘,地形总体西北高,东南低,东南部为平原区,区内第四纪地层由五

大水系(拒马河水系、永定河水系、温榆河水系、潮白河水系、蓟运河水系)联合作用形成冲积扇群和多个沉积凹陷共同构成,具有典型的山前缓倾斜冲积平原特征^[18-20]。平原区第四纪松散沉积物分布广泛,由于受到基底起伏和沉积环境的控制,第四系厚度变化很大,在冲洪积扇顶部,第四系厚度约20~40 m,为单一的砂、卵砾石层或砂、卵砾石顶部覆盖薄层黏性土;在冲洪积扇中下部、冲积平原地区,沉积物厚度逐渐增大,层次增多,颗粒逐渐变细,岩性逐渐过渡为砂、砂砾石、黏性土层相互交错出现,并以黏性土为主^[21-22]。

北京平原区下伏基岩埋深变化较大,被多条断裂切割,主要的第四纪活动断裂有北东(北北东)向的黄庄—高丽营断裂、顺义断裂、南苑—通县断裂、夏垫—马坊断裂和北西向的南口—孙河断裂^[23-24]。由于受到新构造运动的影响,在平原区范围内形成一系列第四纪沉积凹陷中心,如马池口、后沙峪、俸伯、平谷等,第四纪沉积物最厚达1000余米(图1)。

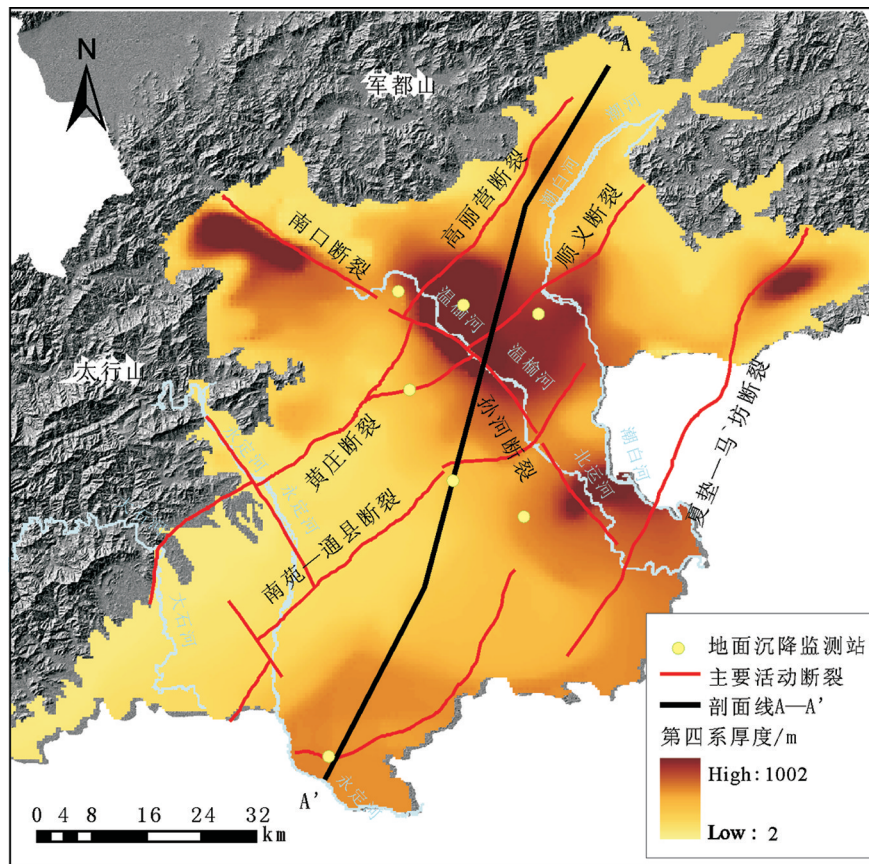


图1 北京平原区地质环境背景
Fig.1 Geological background of Beijing plain

与上述第四系沉积特征相对应,北京平原区含水层系统从西北向东南逐渐由单一含水层向多层含水层系统过渡,在垂向上可划分为3个主要含水岩组:第一含水岩组(潜水层和浅层承压含水层)为第四系全新统(Q₄)和上更新统(Q₃)冲洪积物,底板埋深约25 m和80~100 m;第二含水岩组(中深层承压含水层)为第四系中更新统(Q₂)地层,含水层为多层结构,岩性以中粗砂为主,部分含砾,底板埋深300 m左右;第三含水岩组(深层承压含水层)为第四系下更新统(Q₁)地层,为多层结构,以中粗砂、砾石为主,底界为第四系基底^[22]。

地面沉降的发生、发展与土体的压缩性紧密相关。依据土体物理力学性质和埋深条件,可将北京平原区土体划分为3个主要的压缩层组^[22]:第一压缩层组(Q₄+Q₃),广泛分布于北京平原区,为第四系上更新统冲积相、冲湖积相粉土、黏性土层,底板埋深小于100 m;第二压缩层组(Q₂),主要分布于北京冲洪积平原中下部地区,为中更新统冲洪积、冲湖积的粉土、粉质黏土、黏土层,底板埋深小于300 m;第三压缩层组(Q₁),主要分布在几大沉降凹陷中心,为第四系下更新统河湖相的粉质黏土、黏土层,

顶板埋深大于300 m(图2)。北京平原区压缩层组的划分与第四系含水岩组的划分具有明显的对应关系。

3 研究方法

3.1 时序PS-InSAR监测方法

PS-InSAR的基本思想是从长时间序列的SAR影像中选取那些在时间序列上保持高相干的像素点作为研究对象,利用它们的散射特性在长时间上具有很好稳定性的特点,进而获得可靠的相位信息;通过对相位的时空分析,分解各个相干目标点上的相位组成,包括高程,地表形变以及由于大气引起的相位变化,最后可以得到地表的位移。

其主要步骤为:

(1)SAR影像配准:在所选取的N+1幅SAR影像中,选取一幅作为主影像,其余为辅影像,将N幅辅影像分别配准到主影像空间,要求配准精度达到1/8像元。

(2)差分干涉处理:在影像配准之后,需要进行差分干涉处理。经过差分干涉处理后每个像元均包含如下组分:

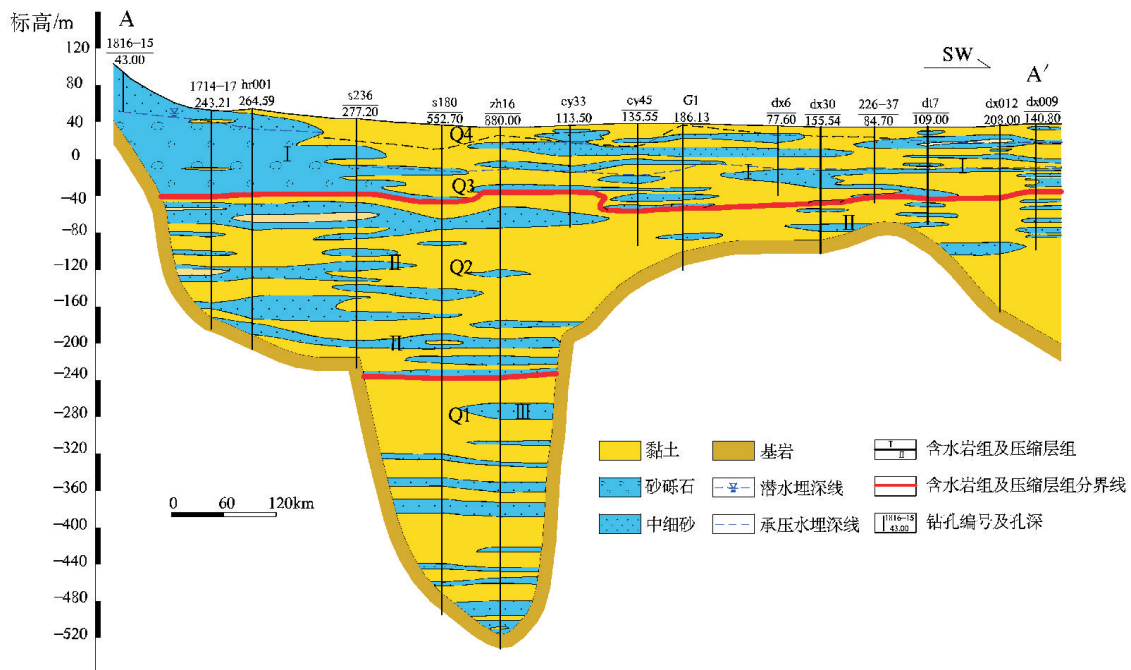


图2 A—A'处水文地质剖面
Fig.2 Hydrogeological cross-section A—A' (for the location see Fig. 1)

$$\Phi_{\text{insar}} = \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{orbit}} + \Phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

其中： Φ_{insar} 为点目标干涉相位； Φ_{def} 为雷达视线方向形变相位； Φ_{topo} 为地形相位； Φ_{atm} 为大气延迟相位； Φ_{orbit} 为轨道误差相位； Φ_{noise} 为噪声相位。

(3)PS点选取：基于一定准则和阈值，在 $N+1$ 幅影像中挑选出那些散射特性较强并且较为稳定的像素点，可以是具有二面角且散射特性较强的建筑物，如道路边沿、桥梁、房屋屋顶以及裸露的岩石等。

(4)地表形变速率提取：在提取PS点后，需要估计每个PS点上的线性形变和DEM误差，并在原始差分干涉相位中将它们减去从而得到残余相位信息，主要包括非线性形变相位、大气相位和噪声。由于大气相位在时间域上不相关并表现为高频信号，非线性形变在空间域上相关性较小并在时间域上具有低频特征。因此，采用滤波处理去除非线性形变和大气相位的影响，获取形变相位信息，进而解算出地面沉降速率。

(5)精度验证：由于InSAR获取的是雷达视线方向(LOS)形变量，在利用水准测量和GPS测量数据进行精度检验时，需将InSAR雷达视线方向形变量投影到垂直方向，进而与水准、GPS形变值进行比较。投影变换模型如下^[25]：

$$\Delta H = \frac{\Delta r}{\cos \theta} - (\Delta E_{\text{GPS}} \cos \Phi + \Delta N_{\text{GPS}} \sin \Phi) \cdot \tan \theta \quad (2)$$

其中， ΔH 为雷达垂直方向形变量； Δr 为雷达视线方向(LOS)形变量； ΔE_{GPS} 为GPS在东方向形变量； ΔN_{GPS} 为GPS在北方向形变量； Φ 为SAR卫星运行轨迹方向(SAR影像方位向)与北方向的夹角； θ 为SAR卫星成像侧视角。

3.2 GIS空间分析方法

文中基于北京平原区地质环境背景条件，选取水准、GPS、基岩标—分层标组、地下水动态等多源监测数据，联合PS-InSAR地面沉降监测结果，构建北京平原区地面沉降统一空间数据场。采用GIS空间叠置分析技术，将多种地面沉降影响因素(区域基底构造；地层岩层、厚度及结构特征；不同含水层系统水位变化)分别与PS-InSAR获取的地面沉降场形变信息进行耦合研究，查明地面沉降与多种影响因素之间的响应关系，对北京市地面沉降的成因机理进行初步探讨。

4 结果分析

4.1 北京平原区地面沉降分布特征

文中选取2011—2013年25景RadarSAT-2雷达卫星SAR影像(卫星重访周期24 d, C波段, 幅宽150 km×150 km)进行差分干涉处理及PS点提取，获取了北京平原区地面沉降速率分布图，并以2013年沉降速率为例，对北京市地面沉降分布特征进行阐述。结果(图3)发现：北京市地面沉降发育较为严重的地区主要出现在平原区东部、北部以及南部等地，存在多个沉降中心，最大沉降速率达到152 mm/a，出现在黑庄户地区，区域不均匀沉降现象明显，并且有连成片的趋势。其中，平原区东部主要发育有来广营—东坝—金盏沉降区和通州台湖—黑庄户沉降区，目前该两大沉降区已经连成一片。平原区北部沉降中心较为分散，其中，海淀苏家坨—上庄一带，最大沉降速率为102 mm/a，昌平沙河—八仙庄—燕丹等地沉降速率均在100 mm/a左右；顺义区的后沙峪—高丽营—南法信一带，沉降速率达到80 mm/a以上，并且在平各庄、李桥镇、杨镇等地存在零星沉降区，沉降速率约为70 mm/a。平原区南部主要为大兴沉降区，较为严重的区域出现在礼贤镇小马坊一带和榆堡镇南的北京市界附近地区，大兴半壁店和瀛海庄等地有零星分布。经栅格计算，平原区年沉降量在50~100 mm的地区面积约为435 km²，年沉降量大于100 mm的地区面积约为116 km²，主要发生在朝阳来广营—东坝—金盏和通州台湖—黑庄户一带。

将2013年度水准测量等值线与InSAR监测结果进行对比分析，发现两者之间具有较高的一致性，这也是对InSAR监测结果的初步验证(图3)。为检验本次InSAR解译精度，分别在地面沉降发育区内选取2013年度实测的35个水准点和35个GPS点进行单点精度检验(图4)。分析发现：InSAR测量结果与水准测量结果吻合程度较高，表现出相同的形变特征，两者之间的互差均在2~7 mm范围之内，并且表现出明显的线性相关性，最大线性相关系数(R^2)达到0.986。同时，将InSAR监测结果与GPS形变量进行对比分析，发现大部分PS点与GPS

点形变结果相一致,个别点位上两者之间互差较大,达到12.7 mm,这可能与GPS高程测量参考基准面(参考椭球面)不同有关。但从整体趋势上看,两者之间线性相关性也比较明显,最大线性相关系数为0.889。由此说明本次InSAR监测成果精度较高,可以较为详细地揭示出北京平原区地面沉降量及空间分布特征(图4)。

4.2 地面沉降与多种影响因素之间响应关系

4.2.1 地面沉降与区域基底构造响应关系

文中将PS-InSAR沉降监测结果与平原区主要活动断裂和沉积凹陷进行叠加分析(图5),发现北京市地面沉降的空间分布具有明显的构造控制特性,沉降区被几大活动断裂分割,地面沉降多发生于几大活动断裂交接部位的沉积凹陷地区。其中,海淀苏家坨—上庄沉降区主要受南口—孙河断裂北西段活动的影响,与马池口第四纪凹陷十分吻合;顺义后沙峪—高丽营—南法信沉降区由于受到黄庄—高丽营断裂北段和南口—孙河断裂的共同作用,主要分布在后沙峪第四纪凹陷区内;东部的朝阳来广营—东坝—金盏沉降区、通州台湖—黑庄户沉降区主要受到南口—孙河断裂南东段的控制,

与区内东坝—天竺新近纪凹陷较为吻合。同时,南口—孙河断裂贯穿整个西北、北部和东部沉降区,将北京主要沉降地区分割成南北两个部分,几大沉降区的发展趋势与活动断裂的走向具有明显的对应关系,构造控制作用十分明显。

由剖面线B—B'和C—C'可以看出(图6):在有活动断裂通过的地区,地面沉降剖面上表现出明显的转折或突变,断裂两侧区域不均匀沉降十分明显。剖面B—B'穿过黄庄—高丽营断裂北段和顺义断裂,在黄庄—高丽营断裂上下盘处,最大差异沉降量达到25 mm/a,最大形变梯度达到42 mm/km;在顺义断裂上下盘处,最大差异沉降量为52 mm/a,最大形变梯度达到35 mm/km。剖面C—C'穿过黄庄—高丽营断裂、南口—孙河断裂、顺义断裂和南苑—通县断裂,其中在黄庄—高丽营断裂处,上下盘最大差异沉降量为39 mm/a,最大形变梯度达到14 mm/km;南口—孙河断裂处,上下盘最大差异沉降量为40 mm/a,最大形变梯度为19 mm/km;顺义断裂上下盘处,最大差异沉降量为40 mm/a,最大形变梯度为51 mm/km;南苑—通县断裂上下盘处,最大差异沉降量达到103 mm/a,最大形变梯

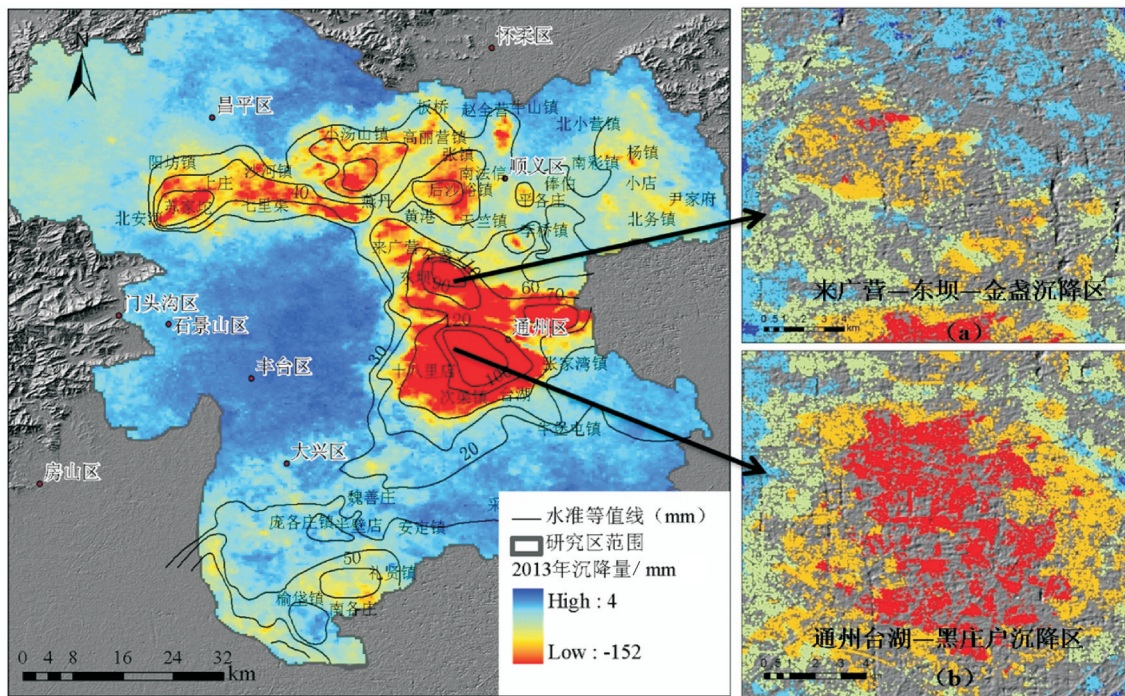


图3 北京平原区地面沉降分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of land subsidence in Beijing area

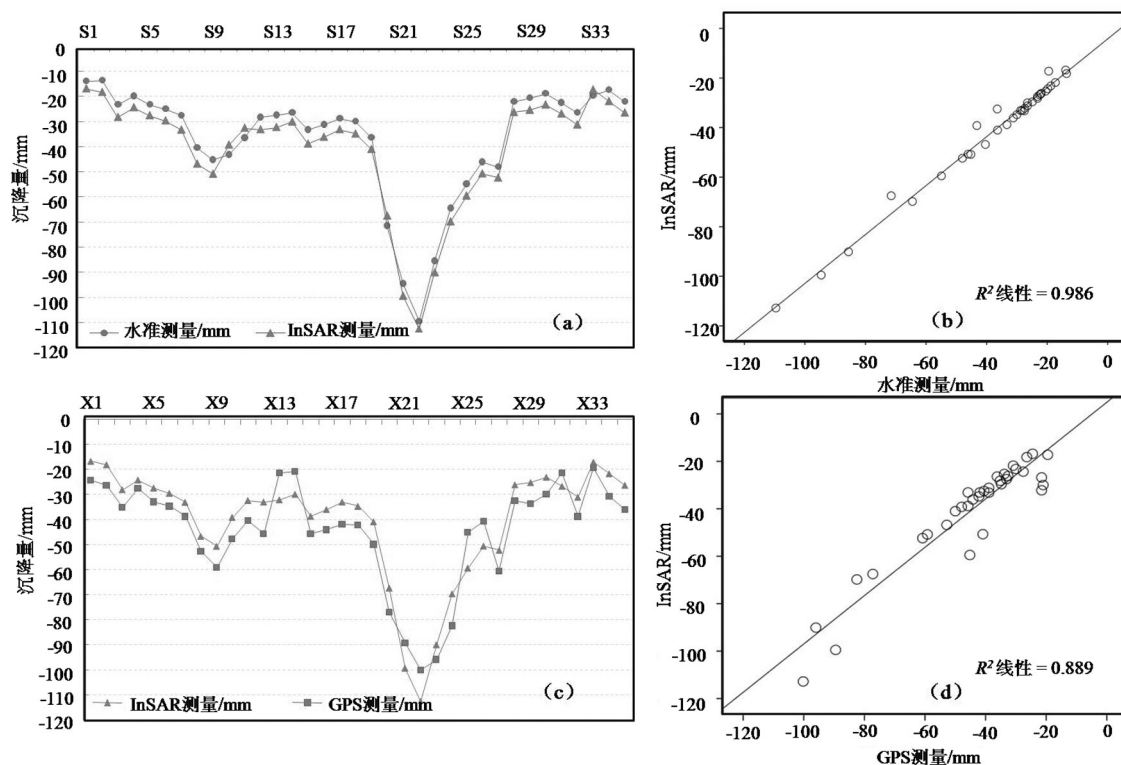


图4 PS-InSAR精度验证

a—2013年水准测量与InSAR测量的沉降量比较;b—水准测量结果与InSAR测量结果的线性关系;

c—2013年GPS测量与InSAR测量的沉降量比较;d—GPS与InSAR测量的沉降量比较

Fig. 4 Accuracy verification of PS-InSAR

a-The comparison of PS-InSAR displacement with leveling measurement in 2013; b-Linear fitting of PS-InSAR and leveling results;

c-The comparison of PS-InSAR displacement with GPS measurement in 2013; d-Linear fitting of PS-InSAR and GPS results

度达到36 mm/km。分析其原因:主要是由于受到区域基底构造的控制作用,在活动断裂两侧的上下盘处,第四系松散沉积物的厚度存在较大的差异性,在相同地下水开采过程中,造成断裂两侧地层出现不均匀沉降。同时,活动断裂上下盘之间的蠕滑变形虽然量值较小,但其影响范围较大,表现出区域性的整体下沉或上升。因此,由活动断裂上下盘之间蠕滑变形所引起的构造性沉降也是地面沉降机理分析中不可忽视的重要因素。

4.2.2 地面沉降与地层岩性、厚度及结构特征响应关系

根据2013年天竺和八仙庄地面沉降监测站内资料显示:天竺站内总体沉降量为42.22 mm,沉降比例最大的地层为102~148 m段,沉降量为14.07 mm,沉降占比达到33.32%,该层位上黏性土占比为34.14%;粉土为15.63%;细砂为13.73%;中粗砂为

23.30%;含砾粗砂为13.20%。八仙庄站内总体沉降量为87.08 mm,沉降比例最大的地层为108~144 m段,沉降量为29.61 mm,占总沉降量的34%,该层位上黏性土占比为82%,细砂为15%,中粗砂为4%。同样,在两个站内的其他监测层位上黏性土所占比例均较高。在地下水开采相同的情况下,黏性土层单位压缩量是砂层和砂砾石层单位压缩量的2~3倍^[22]。由此可知,黏性土的存在是产生地面沉降的重要物质基础,不同层位上的地面沉降量与该层位上黏性土占比呈正比例关系,正是由于黏性土在释水压缩过程中表现出较高的压缩特性,在地下水超量开采过程中,黏性土层不断释水压缩变形,造成地面沉降的快速发展。

前已述及,北京平原区土体共划分为3个主要的压缩层组,将各压缩层组厚度进行累加,得到可压缩黏性土总厚度分区图,并与PS-InSAR监测结

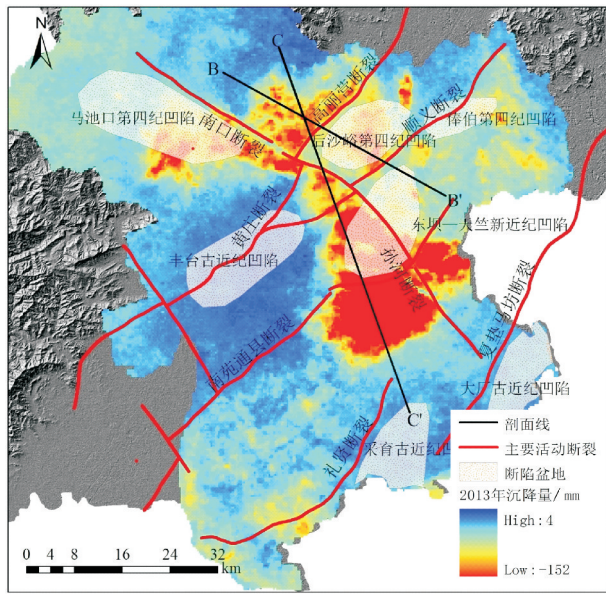


图5 地面沉降与区域基底构造关系

Fig.5 Relationship between land subsidence and basal tectonics

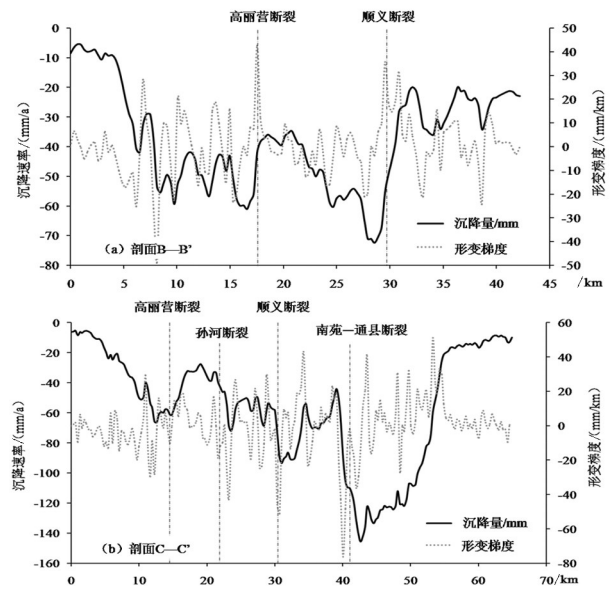


图6 断裂两侧形变特征及梯度

Fig.6 Deformation characteristics and gradient on both sides of the fault

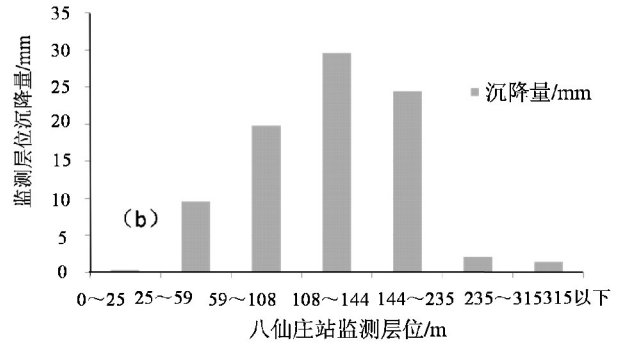
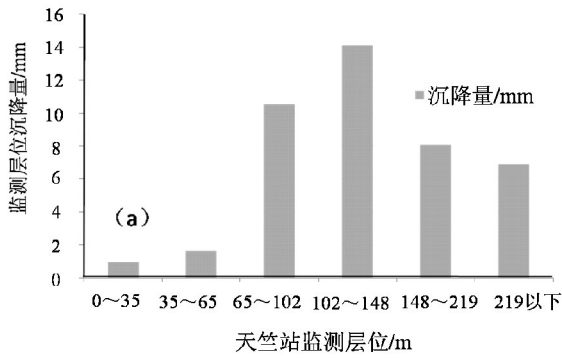


图7 天竺(a)和八仙庄(b)监测站内分层沉降量

Fig.7 Layered settlement of Tianzhu and Baxianzhuang station

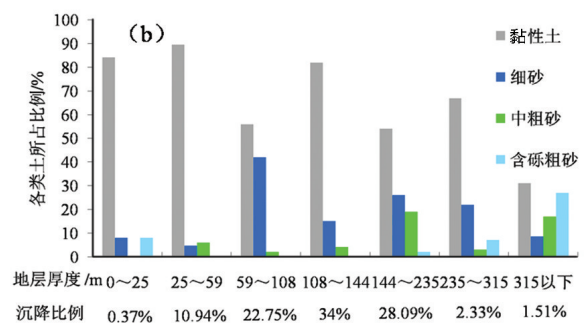
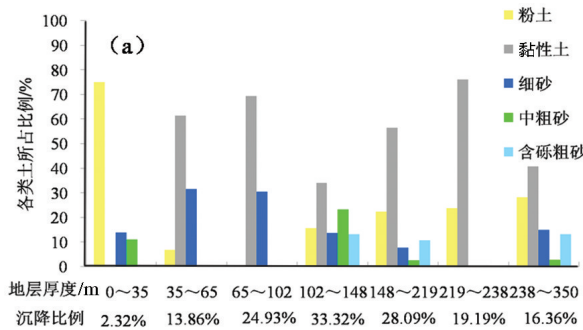


图8 天竺(a)和八仙庄(b)站内工程地质孔地层岩性及沉降占比统计图

Fig.8 Stratigraphic lithology and settlement statistical chart of geological hole in Tianzhu and Baxianzhuang station

果进行耦合分析(图9),发现北京市地面沉降的空间分布与可压缩黏性土层厚度具有显著的相关性,黏性土层累计厚度越大的地区,压缩总量也越大。其中,年沉降速率大于50 mm/a的沉降区大部分都分布在黏性土厚度大于100 m的地区,特别是几个沉降中心以及沉降快速发展的地区,与黏性土厚度最大的地区吻合较好。八仙庄地面沉降中心2013年度沉降量约80 mm/a,该地区黏性土层厚度超过200 m。东部的金盏—楼梓庄地区2013年沉降量超过100 mm/a,其黏性土层厚度也超过200 m。在其他一些沉降速率较快的地区,包括朝阳三间房、黑庄户、通州城区、台湖、海淀苏家坨等地,其黏性土层厚度也都超过100 m。

北京平原区的地层结构从西北向东南,存在由单一结构区向多层结构区转化的韵律,沉积物颗粒由粗变细,厚度逐渐增大,黏性土所占比例逐渐增加,具有典型的山前冲洪积扇特征。文中通过绘制水文地质剖面D—D',并与沿线地面沉降量进行对比分析(图10),进而查明平原区地层结构变化与地面沉降之间的响应关系。剖面线D—D'由西北向东南,起于海淀区林科院,贯穿东部沉降区,止于通州区的吴营村,全长约50 km。其中,在林科院—海

淀区政府—北新桥段,地层结构较为单一,主要以砂卵砾石层为主并夹有薄层的黏性土,土体颗粒较粗,抗压强度高,可压缩性低,不易产生压缩变形,该段对应的地面沉降量较小,为0~10 mm。从北新桥往东南方向,地层逐渐过渡为多层结构区,以黏性土为主,存在多个含水层。其中,在北新桥—小郊亭段,黏性土层逐渐增厚,地面沉降快速发展,在小郊亭地区,地面沉降量达到71.25 mm/a。在小郊亭—定辛庄段,地面沉降形变梯度逐渐增大,最大沉降量约140 mm/a。此后,在定辛庄—张家湾—吴营村段,地面沉降又呈现出减缓的趋势,分析其原因主要是该区域内地下水以农业开采为主,开采层位较浅,地下水易于得到补充,深层地下水开采量较小,由此造成地面沉降逐渐减缓。由此可以看出,北京平原区地面沉降的空间分布特征及变化趋势与北京山前冲洪积倾斜平原的地层结构具有很好的 consistency,沉降范围整体由北西向的单一结构区向南东方向的多层结构区扩张。

4.2.3 地面沉降与地下水位响应关系

北京市第四系孔隙含水层系统可划分为3个主要含水岩组,其中300 m以浅地层可分为4个监测层位,分别为潜水含水层(底板埋深50 m)、第一承压含水层(浅层承压水,顶底板埋深50~100 m)、第二承压含水层(中深层承压水,顶底板埋深100~180 m)、第三承压含水层(深层承压水,顶底板埋深180~300 m)。将PS-InSAR监测结果与不同含水层系统等水位(头)线进行叠加分析发现:地面沉降中心与第二承压含水层水位降落漏斗区高度吻合,这与目前中深层承压含水层为主要开采层相一致(图11)。为查明该层位上(100~180 m)土体变形与水位之间的响应关系,特选取天竺站2005—2013年分层标F3-5和水位观测孔D3-4以及八仙庄站2008—2013年分层标F4-6和水位观测孔D4-4时间序列监测数据进行分析。其中,D3-4观测层位85.7~91.3 m;D4-4观测层位147~195 m。由图12可以看出,两个站内的地下水位均呈周期性往复升降,总体呈下降趋势。对应层位上沉降量一直以较快速率发展,相应土体为持续快速压缩,土层变形与水位变化几乎同步,蠕变变形较小,土体以塑型变形为主,说明该层位上地下水开采与地面沉降的发展具有很好的对应关系。因此,开采第二承压含

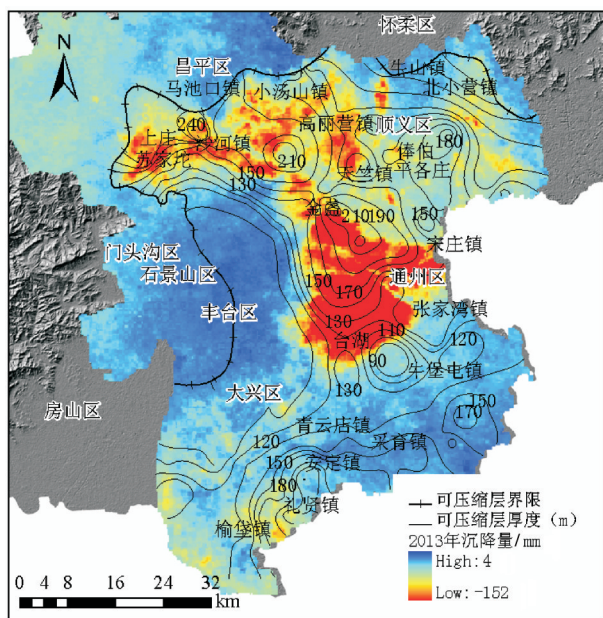


图9 地面沉降与可压缩黏性土厚度关系
Fig.9 Relationship between land subsidence and the thickness of compressed clay soil

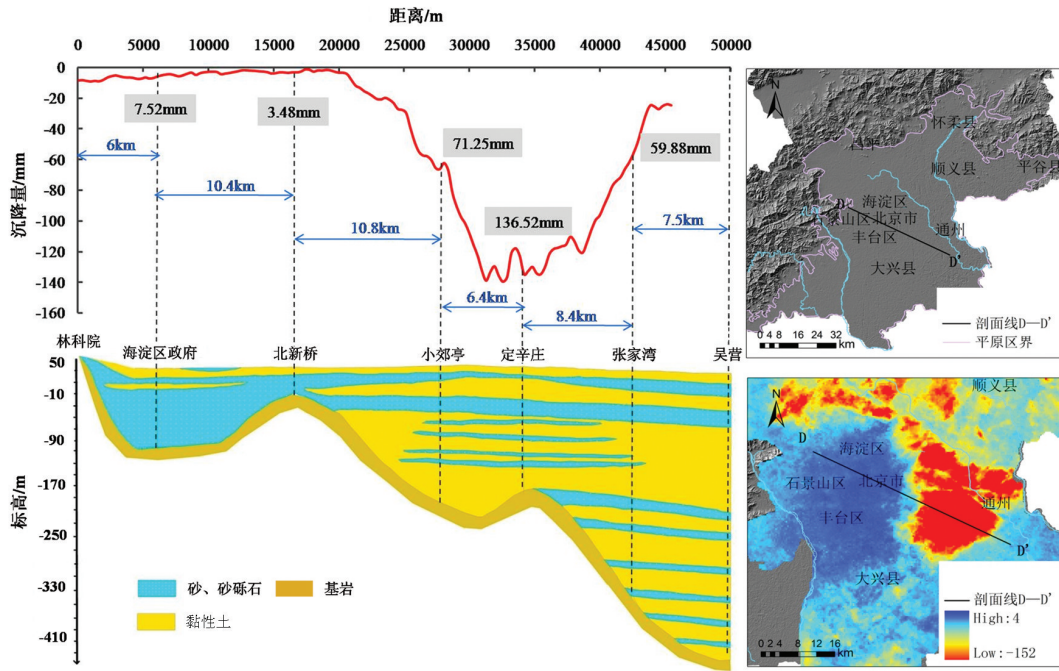


图10 剖面D—D'处地面沉降与地层结构关系

Fig.10 Relationship between land subsidence and stratigraphic structure in D—D'

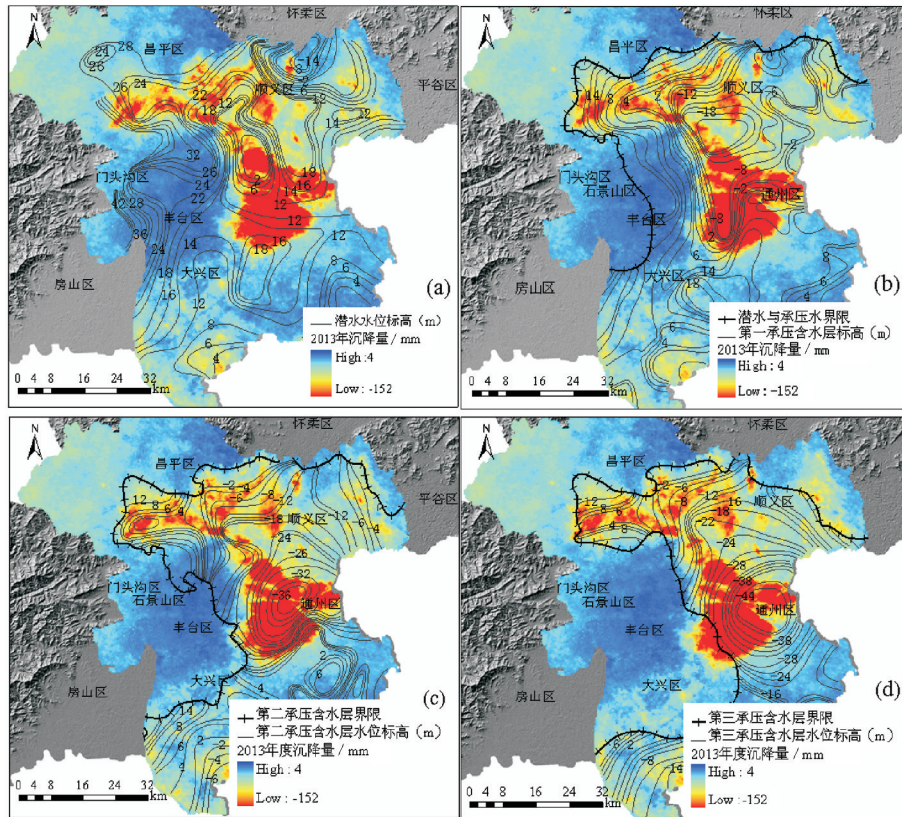


图11 地面沉降与不同含水层水位响应关系

Fig.11 Relationship between land subsidence and groundwater of different aquifers

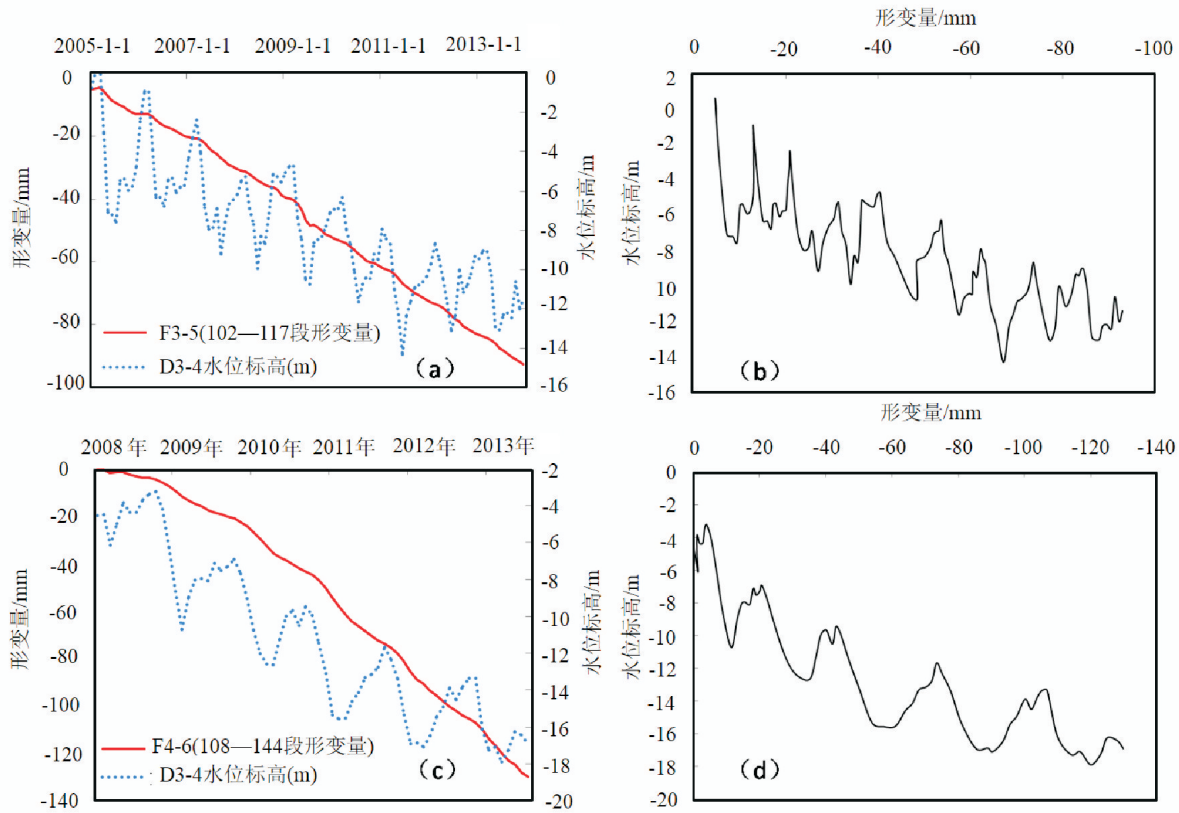


图 12 天竺和八仙庄沉降站内分层标土体变形与水位关系

a—Deformation and groundwater level time series variation of Tianzhu station; b—Groundwater level versus deformation of Tianzhu station; c—Deformation and groundwater level time series variation of Baxianzhuang station; d—Groundwater level versus deformation of Baxianzhuang station

Fig.12 Relationship between the deformation of soil and groundwater level in Tianzhu and Baxianzhuang station
a—Deformation and groundwater level time series variation of Tianzhu station; b—Groundwater level versus deformation of Tianzhu station; c—Deformation and groundwater level time series variation of Baxianzhuang station; d—Groundwater level versus deformation of Baxianzhuang station

水层(100~180 m)地下水对地面沉降影响最大,是目前北京平原区地面沉降的主要贡献层位。

5 结论与探讨

文中选取2011—2013年25景RadarSAT-2雷达影像进行永久散射体差分干涉处理,获取了北京平原区地面沉降分布特征及形变信息,同时将PS-InSAR干涉测量结果与地面沉降多种影响因素进行耦合研究发现:(1)北京市地面沉降发育较为严重的地区主要出现在平原区东部、北部以及南部等地,存在多个沉降中心,最大沉降速率达到152 mm/a,出现在黑庄户地区,区域不均匀沉降现象明显,并且有连成一片的趋势。(2)北京市地面沉降的分布具有明显的构造控制特性,沉降区被几大活动断裂分割,地面

沉降多发生于几大活动断裂交接部位的沉积凹陷地区,尤其与第四纪沉积凹陷十分吻合。地面沉降的发展趋势与活动断裂的走向具有明显的对应关系,在有活动断裂通过的区域,地面沉降剖面线上表现出明显的转折或突变,断裂两侧区域不均匀沉降十分明显。(3)地面沉降分层沉降量与该层位黏性土占比呈正比例关系,其空间分布及变化趋势与平原区的地质结构及可压缩黏性土层厚度具有很好的一致性,沉降范围整体由北西向的单一结构区向南东方向的多层结构区扩张;沉降速率大于50 mm/a的沉降区大多分布在黏性土厚度大于100 m的地区,几大沉降中心与黏性土层厚度较大地区吻合较好。(4)第二承压含水层(顶底板埋深100~180 m)地下水开采对地面沉降影响最大,沉降中心与该

层位地下水位降落漏斗区高度吻合,是地面沉降的主要贡献层位。

文中利用PS-InSAR技术获取了北京平原区地面沉降信息并与多种影响因素进行耦合研究,对北京山前冲洪积倾斜平原模式的地面沉降成因机理进行了初步的探讨。但由于北京平原区地层沉积环境的复杂性,精细刻画每一个地质单元的沉积特征、年代、岩性、厚度等较为困难。在未来的研究中,需进一步搜集平原区各类钻孔、物化探及相关测试数据,逐步缩小研究区范围,量化研究各类影响因素对地面沉降的贡献量。此外,进一步加强InSAR与水文地质学交叉研究,InSAR技术的发展提高了大尺度区域地面沉降样本信息的采集数量,对含水层系统压缩变形的精细刻画起到促进作用。但在其他水文地质过程方面的研究仍需进一步加强,如反演水文地质参数(含水层弹性骨架储水系数、含水层非弹性骨架储水系数),刻画含水层系统结构、沉积特征及水力非均质性,约束地下水—地面沉降数值模型等,这些科学问题都是笔者今后需要加强研究的方向。

参考文献(References):

- [1] Galloway D L, Hudnut K W, Ingebritsen S E, et al. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2573–2585.
- [2] Tomás R, Herrera G, Delgado J. et al. A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain) [J]. *Engineering Geology*, 2010, 111:19–30.
- [3] Bawden G W, Thatcher W, Stein R S, et al. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects[J]. *Nature*, 2001, 412(6849):812–815.
- [4] Hoffmann J, Zebker H A, Galloway D L. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(6):1551–1566.
- [5] 张安京, 叶超, 李宇, 等. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
Zhang Anjing, Ye Chao, Li Yu, et al. *Beijing Groundwater*[M]. Beijing: China Land Press, 2008(in Chinese with English abstract).
- [6] 宫辉力, 张有全, 李小娟, 等. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的北京地区地面沉降研究[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(11): 1261–1266.
Gong Huili, Zhang Youquan, Li Xiaojuan, et al. Land subsidence research in Beijing based on the permanent scatterers In SAR technology[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(11):1261–1266(in Chinese with English abstract).
- [7] 陈强, 刘国祥, 丁晓利, 等. 永久散射体雷达差分干涉应用于区域地表沉降探测[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 737–743.
Chen Qiang, Liu Guoxiang, Ding Xiaoli, et al. Radar differential interferometry based on permanent scatterers and its application to detecting regional ground subsidence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(3): 737–743(in Chinese with English abstract).
- [8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2000, 38(5): 2202–2212.
- [9] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2001, 39(1):8–20.
- [10] 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]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31 (2004):1–5.
- [11] Andrew H, Zebker H A. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series[J]. *Journal of the optical society of America a optics image Science & Vision*, 2007, 24(9): 2737–2747.
- [12] Cao R C, Jiang H Q. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(1): 133–154.
- [13] 张勤, 赵超英, 丁晓利, 等. 利用GPS与InSAR研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1214–1222.
Zhang Qin, Zhao Chaoying, Ding Xiaoli, et al. Research on recent characteristics of spatio-temporal evolution and mechanism of Xi'an land subsidence and ground fissure by using GPS and InSAR techniques[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1214–1222(in Chinese with English abstract).
- [14] 何秀凤, 仲海蓓, 何敏. 基于PS-InSAR和GIS空间分析的南通市市区地面沉降监测[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 129–134.
He Xiufeng, ZhongHaibei, He Min. Ground Subsidence Detection of Nantong City Based on PS-InSAR and GIS Spatial Analysis[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2011, 39(1):129–134(in Chinese with English abstract).
- [15] 廖明生, 裴媛媛, 王寒梅, 等. 永久散射体雷达干涉技术监测上海地面沉降[J]. *上海国土资源*, 2012, 33(3): 5–10.
Liao Mingsheng, Pei Yuanyuan, Wang Hanmei, et al. Subsidence Monitoring in Shanghai Using the PSInSAR Technique[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2012, 33(3): 5–10(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [16] 陈蓓蓓, 宫辉力, 李小娟, 等. PS-InSAR技术与多光谱遥感建筑指数的载荷密度对地面沉降影响的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2198-2202.
Chen Beibei, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. The impact of load density differences on land subsidence based on build-up index and PS-InSAR technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8): 2198-2202(in Chinese with English abstract).
- [17] 葛大庆, 殷跃平, 王艳, 等. 地面沉降-回弹及地下水位波动的InSAR长时序监测——以德州市为例[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1):103-109.
Ge Daqing, Yin Yueping, Wang Yan, et al. Seasonal subsidence-rebound and ground water level changes monitoring by using coherent target InSAR technique: A case study of Dezhou, Shandong[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(1):103-109(in Chinese with English abstract).
- [18] 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 等. 北京平原地区地质系统[J]. 城市地质, 2009, 4(3): 6-12.
Cai Xiangmin, Luan Yingbo, Guo Gaoxuan, et al. Geological System in Beijing Plain Area[J]. City Geology, 2009, 4(3): 6-12 (in Chinese with English abstract).
- [19] 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 等. 北京平原第四系的三维结构[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1021-1029.
Cai Xiangmin, Luan Yingbo, Guo Gaoxuan, et al. 3D Quaternary geological structure of Beijing plain[J]. Geology in China, 2009,36(5): 1021-1029(in Chinese with English abstract).
- [20] 蔡向民, 郭高轩, 张磊, 等. 北京城湖泊的成因[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1092-1098.
Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Zhang Lei, et al. The origin of lakes in Beijing City[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1092-1098(in Chinese with English abstract).
- [21] 田芳, 郭萌, 罗勇, 等. 北京地面沉降区土体变形特征[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 236-242.
Tian Fang, Guo Meng, Luo Yong, et al. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing[J]. Geology in China, 2012,39(1):236-242 (in Chinese with English abstract).
- [22] 贾三满, 王海刚, 赵守生, 等. 北京地面沉降机理研究初探[J]. 城市地质, 2007, 2(1): 20-26.
Jia Sanman, Wang Haigang, Zhao Shousheng, et al. A tentative study of the mechanism of land subsidence in Beijing[J]. City Geology, 2007, 2(1): 20-26(in Chinese with English abstract).
- [23] 焦青, 邱泽华. 北京平原地区主要活动断裂带研究进展[C]//中国地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力论文集. 北京: 地震出版社, 2006: 72-84.
Jiao Qing, Qiu Zehua. Research Progress of Major Active Faults in Beijing Plain Area[C]//Institute of Crustal Dynamics, CEA(ed). Crustal Tectonics and Crustal Stress. Beijing: Seismological Press, 2006:72-84 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张磊, 白凌燕, 蔡向民, 等. 北京平原南口—孙河断裂带北西段活动性分析[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 902-911.
Zhang Lei, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, et al. An analysis of the activity of the northwest part of Nankou-Sunhefault[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 902-911(in Chinese with English abstract).
- [25] 陈强, 刘国祥, 胡植庆, 等. GPS与PS-InSAR联网监测的台湾屏东地区三维地表形变场[J]. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3248-3258.
Chen Qiang, Liu Guoxiang, Hu Zhiqing, et al. Mapping ground 3-D displacement with GPS and PS-InSAR networking in the Pingtung area, southwestern Taiwan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(10): 3248-3258(in Chinese with English abstract).