

基于永久散射体雷达干涉测量技术的 北京市地面沉降研究*

官辉力¹ 张有全^{1,2,3**} 李小娟¹ 卢学辉¹ 陈蓓蓓¹ 顾兆芹¹

1. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 地面沉降是北京平原区主要地质灾害之一, 在过去的几十年中, 其沉降范围和幅度逐年扩大. 文中采用永久散射体干涉测量技术(PS-InSAR)进行检测、监测该地区地表形变特征. 通过分析时间序列的干涉测量结果发现, 该地区地面沉降存在构造控制的特性, 尤其是在北部沉降区. 揭示了北京市第四纪顺义凹陷与沙河凹陷地区地面沉降趋势及范围受黄庄-高丽营、南口-孙河断层控制. 同时将 PS-InSAR 提取的地面沉降等值线与粘性土厚度分区结果对比分析发现, 该地区地面沉降多发生在粘性土厚度大于 50 m 的地段范围内, 沉降中心多数位于粘性土厚度大的地区.

关键词 地面沉降 永久散射体 干涉测量

过量开采地下水而引发的地面沉降已成为世界范围的地质环境问题. 由于缺乏观测数据, 使得在过去很难准确的定义形变区域的范围、形变幅度以及季节性形变特征. 随着新型合成孔径雷达(SAR)传感器以及 InSAR 技术的发展, 使用星载雷达数据可以以高时、空分辨率获取毫米级到厘米级的地表形变信息. 传统的 InSAR 干涉测量技术(D-InSAR)已经在干旱地区、植被比较稀疏的地区取得了较好的应用效果^[1,2]. 然而在空间去相干、时间去相干以及大气延迟影响比较严重的地区, 使用传统的 D-InSAR 技术进行干涉测量很难达到满意的效果, 这三个方面已经成为制约 D-InSAR 技术发展和应用的主要限制因素^[3,4].

Ferretti 等^[5]提出了永久散射体(PS)技术方法. 在传统 D-InSAR 技术基础上发展起来的永久散射体干涉测量技术(Persistent Scatterers for SAR In-

terferometry, PSInSAR)能够有效降低时间、空间去相干影响以及减弱大气延迟引起的误差组分. Hooper 等^[6]提出了一种新的 PS 点识别及相位组分分析的方法-StampPS, 即采用幅度离散特征和干涉相位空间相关性特征建立 PS 识别算法, 用于识别永久散射体. 该算法能够在非城区(郊区)识别出一些稳定的像素. 同时该算法适用于非稳定形变区, 即无须先验形变速率知识. 在一定程度上克服了由于时间去相干引起的干涉问题, 提高了干涉像对的可用数量和干涉的时间分辨率.

本文目的在于采用改进的永久散射体干涉测量方法(Stamps)提取北京平原北部地区的地面沉降信息, 通过分析时间序列的形变信息, 结合本底地质资料研究区域沉降的分布特征及与地层、构造的关系, 为地下水、地面沉降模型的刻画与三维数值模型的建立提供基础依据.

2009-05-20 收稿, 2009-09-08 收修改稿

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2006AA12Z111)、国家重点基础研究发展计划(批准号 2006CB708405)和国家自然科学基金(批准号 40771170/D0120)资助项目

** 通信作者, E-mail: zhangyouquan1361@gmail.com

1 永久散射体干涉测量方法处理流程

PS-InSAR 技术进一步深化传统 D-InSAR 技术, 通过校正大气、轨道和数字高程模型 (DEM) 误差, 进而提取精确的形变和速率 (相对于地面特定参考点), 本次采用的 StampPS 算法^[6] 技术流程见图 1.

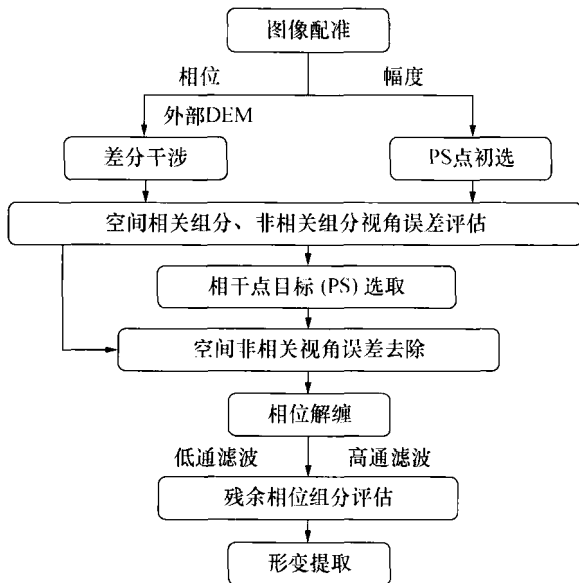


图 1 永久散射体干涉技术处理流程图

首先根据选定的主、辅图像进行干涉, 引入外部 DEM 消去大部分地形相位组分 (二轨法), 将 K 个干涉对逐一进行相位差分处理, 得到相应的 K 幅差分干涉相位图.

去地形相位后, 第 i 个差分干涉对、第 x 个像素的相位可以表示为五个相位组分的和 $\phi_{x,i}$.

$$\phi_{x,i} = \phi_{\text{def},x,i} + \phi_{\epsilon,x,i} + \phi_{\text{atm},x,i} + \phi_{\text{orb},x,i} + \phi_{\text{n},x,i} \quad (1)$$

其中, $\phi_{\text{def},x,i}$ 是指视线方向上的形变相位, ϕ_{ϵ} 是指引入外部 DEM 的误差所引起的残余地形相位, $\phi_{\text{atm},x,i}$ 是指卫星两次过境大气延迟相位差, $\phi_{\text{orb},x,i}$ 是指轨道误差引起的相位, ϕ_{n} 是指噪声组分 (像素内散射体变化、热噪声和配准误差所引起的. 正如 PS 所定义的, PS 像素点的 ϕ_{n} 足够小, 以至于不能完全模糊差分干涉相位信号).

相位组分 $\phi_{\text{def},x,i}$, $\phi_{\text{atm},x,i}$, $\phi_{\text{orb},x,i}$ 在一定距离 (L) 尺度上是空间相关的, 而 ϕ_{ϵ} , ϕ_{n} 在相同的距离上是空间非相关的, 且在 L 距离范围内均值为零. 如果

已知候选 PS 像素的位置, 那么以像素 X 为中心, 对以 L 为半径的圆内所有其他像素的相位值进行平均, 可得

$$\bar{\phi}_{x,i} = \bar{\phi}_{\text{def},x,i} + \bar{\phi}_{\text{atm},x,i} + \bar{\phi}_{\text{orb},x,i} + \bar{\phi}_{\text{n},x,i} \quad (2)$$

其中, 均值条表示以 L 为半径搜索区内的样本均值, $\bar{\phi}_{\text{n}}$ 是 ϕ_{ϵ} , ϕ_{n} 样本均值的和, 假设非常小, 由 (1) 式减去 (2) 式得到如下结果

$$\phi_{x,i} - \bar{\phi}_{x,i} = \phi_{\epsilon,x,i} + \phi_{\text{n},x,i} - \bar{\phi}'_{\text{n},x,i} \quad (3)$$

其中, $\bar{\phi}'_{\text{n},x,i} = \bar{\phi}_{\text{n},x,i} + (\bar{\phi}_{\text{def},x,i} - \phi_{\text{def},x,i}) + (\bar{\phi}_{\text{atm},x,i} - \phi_{\text{atm},x,i}) + (\Delta \bar{\phi}_{\text{orb},x,i} - \phi_{\text{orb},x,i})$.

由 DEM 不确定性带来的相位误差与垂直基线 B_{\perp} 成比例

$$\phi_{\epsilon,x,i} = B_{\perp,x,i} K_{\epsilon,x} \quad (4)$$

其中, K_{ϵ} 是比例常量, 代入 (3) 式得

$$\phi_{x,i} - \bar{\phi}_{x,i} = B_{\perp,x,i} K_{\epsilon,x} + \phi_{\text{n},x,i} - \bar{\phi}'_{\text{n},x,i} \quad (5)$$

如 PS 定义所述, 像素 x 处 ϕ_{n} 足够小, 使用所有可以利用的干涉对, 采用最小二乘法评估出像素 x 处的 K_{ϵ} , 该项是唯一与基线相关的项.

我们定义一个基于像素时间相干性的评价方法:

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp \{ j(\phi_{x,i} - \bar{\phi}_{x,i} - \hat{\phi}_{\epsilon,x,i}) \} \right| \quad (6)$$

N 为可利用的干涉对数, $\hat{\phi}_{\epsilon,x,i}$ 是对残余地形相位 $\phi_{\epsilon,x,i}$ 的评估, γ_x 是一种测量相位噪声水平的方法, 因此也可作为判断像素是否为真正 PS 点的指示.

算法需要初选 PS 点, 利用其相位来计算“圆内相位均值”. 为了节省计算时间, 通过幅度离散指数进行 PS 点的初选^[5].

对于每个初选 PS 点, 减去搜索半径内参与分析的 PS 点的相位均值, 评估 $K_{\epsilon,x}$ 并且计算 γ_x . 据统计分析可知, 像素 γ_x 越高, 越像 PS 点. 因此暂时拒绝低 γ_x 值的 PS 候选点, 使用剩下的 PS 候选点重新计算圆内的相位均值, 然后对每个候选点重新计算 γ_x . 总体来讲, $\bar{\phi}'_{\text{n},x,i}$ 将比以前更小, 通过迭代一定时间, $\bar{\phi}'_{\text{n},x,i}$ 的贡献降低到很小, 以至于

γ_r 主要由 $\phi_{n,r,i}$ 控制. 最后的步骤是通过计算的 γ_r 值选取最终的 PS 点.

随后, 通过减去评估的 $\Delta\phi_{e,r,i}$ 值, 即可校正地形误差相位组分.

$$\phi_{r,i} - \hat{\phi}_{e,r,i} = \phi_{def,r,i} + \phi_{atm,r,i} + \phi_{orb,r,i} + \phi'_{e,r,i} + \phi_{n,r,i} \quad (7)$$

其中 $\phi'_{e,r,i}$ 是由于 $K_{e,r}$ 评估不确定性所引起的残余 DEM 误差, 包括一些空间相关的 DEM 误差, 由于临近 PS 点的空间相关性 DEM 误差相差不大, 该项对相位解缠影响可以忽略. 只要 PS 点的密度达到一定要求, 那么在校正完 DEM 误差相位组分后, 临近 PS 点的绝对相位差总体上不到 π 弧度, 校正后的相位值可以被正确的解缠, 本文采用的是三维相位解缠算法^[6].

在解缠后, 除形变相位组分 ϕ_{def} 外, 仍有四项误差组分存在于(7)式中. 与形变相位组分 ϕ_{def} 不同, 这些组分的空间相关部分在时间上是非相关的. 因此, 通过对解缠后的相位结果在时间上进行高通滤波, 在空间上进行低通滤波, 能够评估出空间相关性误差^[5]. 从(7)式减去这些组分, 剩下的即为形变相位和空间非相关误差, 这个误差可以模型化为噪声, 最后获取到形变相位值.

2 数据处理与结果分析

2.1 数据选择与分析

研究区位于北京北部平原地区, 如图 2 所示, 包括北京市城八区、北部密怀顺主要沉降区和通州部分地区. 依据过境的星载 SAR 数据轨道分布和存档情况, 选取欧空局 Envisat 卫星的 ASAR 数据作为干涉测量处理的数据源.

本次选取降轨 ASAR 数据 16 景, 其中 15 景数据在 3 年时间段内保持着较好的相干性, 存档 ASAR 数据无年份缺失情况. 基于相干性和干涉对数目两方面考虑, 选取 2005 年 12 月的 ASAR 数据 (Orbit: 3579, Track: 218) 作为主图像, 从而满足时间、空间基线达到相对最优的要求, 序列干涉对时间、空间基线分布情况如图 3 所示, 所选数据在城区保持着高相干的特性, 最大的时间间隔为 734 d.

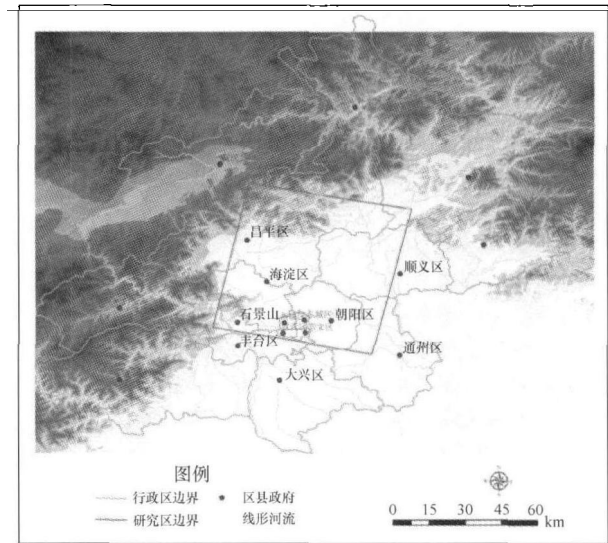


图 2 研究区地理位置图

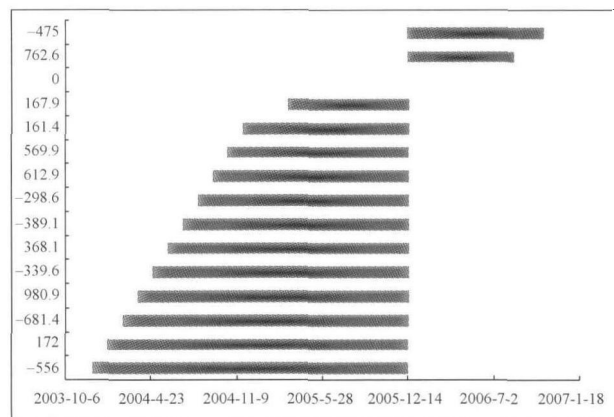


图 3 ASAR 基线分布图

横轴为时间、纵轴为空间(m)

2.2 PS 点选取结果

利用 2003—2006 年的 ASAR 数据、DEM 数据, 进行了 D-InSAR、PS-InSAR 技术的干涉处理, 处理流程如图 1 所示. 采用新的 PS 算法 (StamPS) 在北京地区获得了较好的应用效果. 仅以首都机场地区为例 (图 4) PS 点密度达到 $300/\text{km}^2$, 在顺义有植被覆盖地区 (郊区) 识别出的永久散射体密度达到 $40/\text{km}^2$, 较传统的 PS 技术有了长足的进步.

在研究区内 (如图 2), 3 年时段的 ASAR 干涉数据集中共有 4120180 个相干点目标 (PS 点) 被识别出来 ($129/\text{km}^2$), 这些 PS 点保持着较好的相干性. 约有 338590 个目标点的相干性超过了 0.6, 并且 94990 个点的相干性超过了 0.8 (如图 5), 这在一定



图 4 首都机场地区 PS 点选取结果图
图中深红色点为选取出的永久散射体点

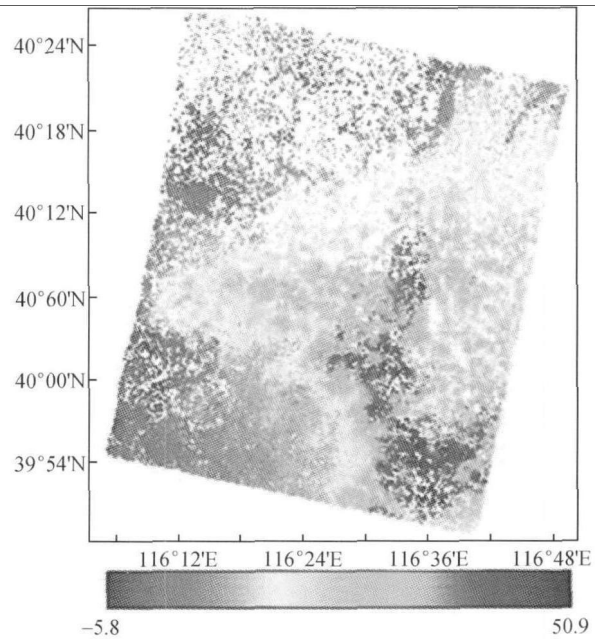


图 6 北京地区地面沉降速率分布图 (mm/a)

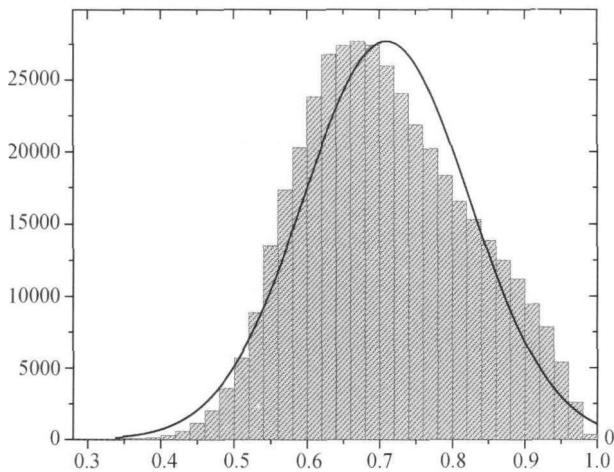


图 5 ASAR 序列 PS 点相干性分布图

程度上保证了干涉处理中 PS 点的空间密度。

2.3 北京地区地面沉降速率分布情况

根据时间序列形变结果提取北京市地面沉降速率分布图, 结果表明北京地区地面沉降速率差异性很大(如图 6, 图中蓝色正值表示沉降, 红色负值是由于所选解算参考点也在缓慢沉降, 速率约为 5.8 mm/a)。

其中沉降梯度比较大的地区主要位于第四纪凹陷边界地区, 在南口-孙河断层西北段、黄庄-高丽营断层北段、顺义良乡断层北段垂直形变速率差异主要是由于早期的断层活动对断层两侧的沉积环境

有一定控制作用, 造成了不同厚度的第四纪沉积物厚度, 最终在区域地下水开采时导致了含水层介质释水压缩的差异。其中在黄庄-高丽营、顺义-良乡断裂北段处还分别发现了平行于断裂的西王路地裂缝和顺义地裂缝, 这些地裂缝是由于垂向差异压缩引起, 还是由于在长期过量开采地下水过程中, 断层边界两侧渗透系数的差异而引起的水平形变所致? 这些问题有待深入开展工作。

通过将北京市 1970—2003 年水准测量结果(图 7 中红色线)与 2003—2006 年 PS-InSAR 提取形变

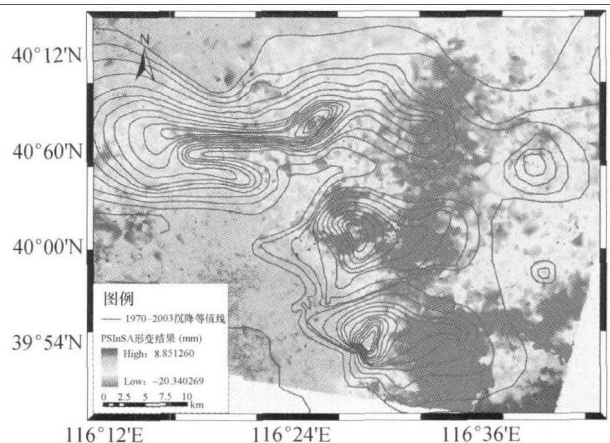


图 7 1970—2003 沉降等值线与 2003—2006 沉降趋势对比图

红色线为 1970—2003 年沉降等值线

结果对比发现,二者在形变空间分布上有着一致性,这也是对 PS-InSAR 结果的初步验证。通过对时间序列形变结果分析表明,研究区沉降在时间、空间尺度上是变化的,形变速率和形变空间范围随时间变化较大。北京平原地区原有的五个离散沉降漏斗已经连成一片,沉降中心有东移趋势(如图 7)。

2.4 地面沉降与基底构造关系

地层岩性及结构特征是产生地面沉降的重要地质背景。针对北京的地面沉降问题及其地质背景信息,一些学者和研究人员进行了一系列地球勘察技术、古土壤、地球物理学的调查^[7,8],提出该地区的地面沉降可解释为由于过量开采地下水而导致的。通过分析时间序列的干涉测量结果发现,位于北部顺义、沙河沉降区域沉降趋势及范围受构造(断层)控制。该地区发育着 NNE 走向的黄庄-高丽营断裂、顺义-良乡断裂和 NW 向的南口-孙河断裂(如图 8,图中红色正值表示沉降)。其中顺义地区地面沉降的空间分布模式受顺义-良乡、黄庄-高丽营北段断裂控制,西北侧以黄庄-高丽营断层为边界,东南侧以良乡-顺义断层为界,这主要是由于这两条断裂北段为北京平原顺义凹陷的边界断裂,凹陷内的第四纪沉积物厚度大于两侧约 200 m 左右,断层对形变的控制作用主要体现在两侧含水层可压缩材料的厚度差异。目前,部分地区地面沉降已经越过断层控制区域,沿着平行于区域断层系统的方向发展。

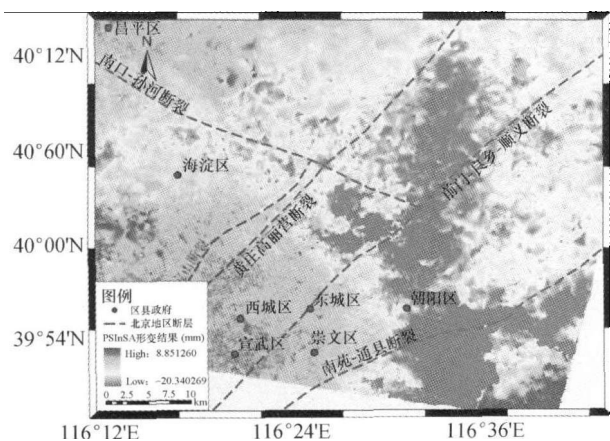


图 8 北京市地面沉降趋势图

2.5 地面沉降与含水层系统介质材料关系

同一地区在相同开采条件、相同水头降深的情

况下,粘性土层单位压缩量较大,砂层、砂砾石层单位压缩量较小。北京地区以粉土、粘性土层为主的含水层介质单位沉降量是以砂层、砂砾石层为主要岩性层组单位沉降量的 2—3 倍,是地面沉降的主要贡献层。通过将提取的地面沉降等值线与粘性土厚度分区图(如图 9)对比发现,二者有较好的一致性。沉降中心多数位于粘性土厚度大的地区。地面沉降主要发生在粘性土层厚度大于 50 m 的地段范围内,进一步证实了前人的研究推断^[8]。

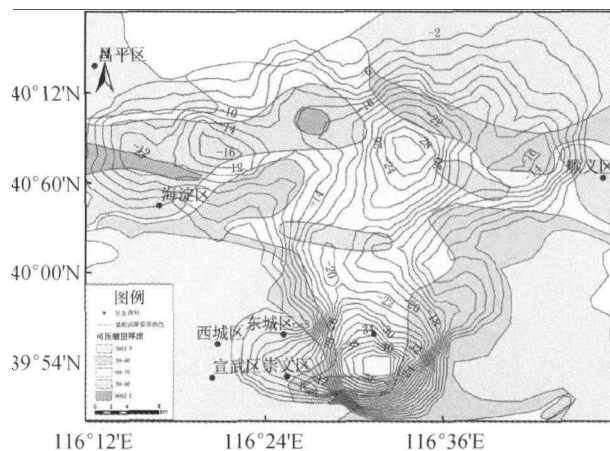


图 9 地面沉降与分层可压缩厚度分区图

3 结论

为了克服传统雷达差分干涉技术(D-InSAR)在地表形变监测中受时、空去相关及大气延迟的负面影响,本文采用了永久散射体干涉测量技术,采用幅度离散指数和干涉相位空间相关性特性相结合的方法评估相位组分并识别永久散射体。以北京城区为实验区,选取 2003—2006 年间的 15 景 ASAR 数据进行永久散射体干涉测量,得到了北京市平原区 3 年间的地表形变场、速度场。通过将 PS-InSAR 监测的结果与 GPS 形变监测结果对比分析发现,二者有较好的一致性,在时间序列测量结果中有 8 个测段形变监测精度达到了 10 mm 以内^[9,10]。但是 PS-InSAR 获取的形变幅度较 GPS 测量结果要大些,这可能与二者对比验证目标所处不同地层层位有关,详细对比验证工作有待进一步开展。

通过时间序列 PS-InSAR 干涉测量结果与本底构造信息结合分析,初步结果表明研究区第四纪断层(黄庄-高丽营、顺义-良乡北段)在顺义凹陷扮演着地

面沉降障碍角色,初步分析是由于断层两侧差异性第四纪沉积物厚度所引起的。然而在沿着断层走向以北部分地区,当第四纪沉积物厚度相近时也存在较大形变差异,其原因可能是在断层早期的活动中分离了两个不同压缩性的含水层介质材料,或者在各向均质材料里扮演着地下水流阻水边界和形变边界。然而需要更多的第四纪沉积物地层细节信息、水头信息,用以准确解释这一现象,充分理解地质构造对含水层系统流体动力学特征的影响。这些为三维地面沉降数值模型刻画和模拟提供了新的视角。

致谢 感谢 Delft 理工大学 Hoppeer 博士提供干涉软件 StamPS 及咨询,美国 Stanford 大学提供的解缠软件,荷兰 Delft 理工大学提供的 Doris 软件及提供的精密轨道星历。

参 考 文 献

- 1 Amelung F, Galloway DL, Bell JW, et al. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 1999, 27(6): 483—486
- 2 Hoffmann HA, Galloway DL, Amelung. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resources Research*, 2001, 37(6): 1551—1566
- 3 Zebker H, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950—959
- 4 Hanssen R. *Radar Interferometry*. Kluwer: Academic Publishers, 2001
- 5 Ferretti C, Rocca F. Permanent scatterers insar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001, 39(1): 8—20
- 6 Hooper A, Zebker H, Segall. P, et al, A new method for measuring information on volcanoes and other natural terrains using insar persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett*, 2004, 31(23), 5, doi. 10.1029/2004GL021737
- 7 焦 青, 邱泽华. 北京平原地区主要活动断裂带研究进展. *地壳构造与地壳应力论文集*. 2006, 72—84
- 8 贾三满, 王海刚, 赵守生, 等. 北京地面沉降机理研究初探. *分析研究*, 2007, 2(1): 20—26
- 9 吴培稚, 徐 平, 邢成起, 等. 东三旗台站的 GPS、体应变和 水位观测. *地震*, 2006, 3: 133—137
- 10 张有全. 星载合成孔径雷达干涉测量在地面沉降中的应用研究. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2008