

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.04.03

引用格式: 于海若,宫辉力,陈蓓蓓,等.新水情下利用 InSAR – GRACE 卫星的新兴风险预警与城市地下空间安全展望[J]. 国土资源遥感,2020,32(4):16 – 22. (Yu H R, Gong H L, Chen B B, et al. Emerging risks and the prospect of urban underground space security based on InSAR – GRACE satellite under the new hydrological background [J]. Remote Sensing for Land and Resources ,2020, 32(4):16 – 22.)

新水情下利用 InSAR – GRACE 卫星的新兴 风险预警与城市地下空间安全展望

于海若^{1,2,3,4,5,6,7}, 宫辉力^{1,2,3,4,5,6,7}, 陈蓓蓓^{1,2,3,4,5,6,7}, 周超凡^{1,2,3,4,5,6,7}

(1. 首都师范大学水资源安全北京实验室,北京 100048; 2. 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京 100048; 3. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048; 4. 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; 5. 首都师范大学地面沉降机理与防控教育部重点实验室,北京 100048; 6. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; 7. 自然资源部京津冀平原地下水与面沉降野外科学观测研究站,北京 100048)

摘要:城市地下空间的开发利用引发的区域地面沉降是威胁京津冀城市群安全的重大灾害隐患。文章简要回顾了合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)技术的发展历史,系统总结了重力恢复和气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)卫星在地下水储量应用方面取得的进展,阐述了制约沉降的多种因素最终归为地下空间多元场的思想。综合分析后认为,在南水北调 – 地下水开采相互作用的新水情背景下,InSAR 和 GRACE 技术结合是研究地下空间演化对地面沉降影响的全新手段;结合 InSAR – GRACE 技术,重新发现区域水循环规律,量化多元场对沉降演化的贡献,提出地下空间演化的地表响应研究框架,揭示地面沉降响应模式的形成机理,从而建立面向地下空间安全的新兴风险防控预警机制,实现对区域的科学调控。

关键词: InSAR – GRACE; 地下空间演化; 地面沉降响应; 多元场相互作用; 调控机理

中图法分类号: P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 – 070X(2020)04 – 0016 – 07

0 引言

京津冀地区拥有高密度城市集群、高强度地下水开采和高速一体化交通网络。截至 2013 年底,华北平原年均沉降大于 20 mm 的面积为 4.85 万 km²,约占总面积的 42.3%;大于 50 mm 的面积为 1.24 万 km²,约占总面积的 10.8%。京津冀平原区地下水可开采资源量为 146 亿 m³/a,多年平均开采量 164 亿 m³,因不科学开采/开采层位有问题的水量约 18 亿 m³/a。其中,100 m 以下深层地下水开采严重,不科学开采量为 12.7 亿 m³/a,面积约 6 万 km²^[1]。2014 年全球最大规模调水工程——南水北调中线

正式通水,它的全线贯通为研究京津冀沉降区地下水位与地面沉降的关系及机制提供了良好契机。京津冀一体化的推进,产业结构升级、高科技产业园区建设,高密度城市集群、高速一体化交通网,人地矛盾及空间需求增加^[2],城市地下空间开发成为必然趋势,这种工程扰动现象诱发的地面沉降问题也逐渐凸显。在南水北调 – 地下水开采相互作用的新水情背景下,地下空间开发引起的地表沉降机理亟待揭示,重新发现区域沉降演变规律对实现科学调控、促进区域发展、保障区域安全有现实意义。

地面沉降机理研究不局限于单一主控因素,应该与地表地下研究相结合,将制约沉降的地下水降落漏斗与水循环过程、动静载荷与地下空间分布等

收稿日期: 2019 – 12 – 12; 修订日期: 2020 – 04 – 16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“京津冀典型区地下空间演化与地面沉降响应机理研究”(编号: 41930109/D010702)、国家自然科学基金面上项目“南水进京背景下地面沉降演化机理”(编号: 41771455/D010702)、北京卓越青年科学家项目(编号: BJJWZYJH01201910028032)、北京市自然基金项目“新水情背景下京津高铁沿线地面沉降演化机制及调控方法”(编号: 8182013)和北京市优秀人才培养青年拔尖个人资助项目共同资助。

第一作者: 于海若(1991 –),女,博士研究生,主要从事地图学与地理信息系统研究。Email: 1284869155@qq.com。

通信作者: 宫辉力(1956 –),男,博士生导师,主要从事地理信息系统和遥感的教学与应用研究。Email: gonghl@263.net。

因素的相互作用和系统演化首次归因为地下空间演化的地表响应,即地面沉降量是地下空间多元场演化的响应函数。地下空间演化的地表响应主要包括沉降响应和重力响应2方面,沉降响应主要是指上述因素使地表发生的形变响应;重力响应主要是指大区域地下水渗流场演化过程识别与资源评价以及基于合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)卫星获取地下水模型。基于重力恢复和气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)全天候-全天时的优点并与重力卫星 GRACE 结合研究地下空间开发的地表响应将有突破性进展。在 InSAR 和 GRACE 技术结合基础上,发现新水情背景下区域水循环变化过程和地面沉降主控因素的新变化,提出通过建立耦合模型来量化多元场对沉降演化的贡献,进而揭示地下空间演化的地面沉降响应模式。这一新思路框架不仅可以拓展识别地面沉降形成机理的研究方法;还为建立面向地下空间安全的新兴风险防控机制提供可靠支持。

1 InSAR - GRACE 卫星和技术革新

1.1 InSAR 卫星应用现状

InSAR 是利用雷达成像传感器获取被测对象具有相干性的复数图像信息,并通过配准、基线估计、干涉处理、相位解缠等处理,由干涉相位反演地形信息或形变信息的技术。InSAR 技术具有全天时(能够根据自己的需求发射电磁波)、全天候(波长短、穿透能力强)、高精度、连续地面观测(大区域覆盖)等优势。目前典型的星载合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)系统包括1991年 ERS-1(2011年关闭),1995年 ERS-2,1995年 RADARSAT-1,2007年 RADARSAT-2,2002年 ENVISAT,2006年 ALOS-PALSAR,2007年 TerraSAR-X 和 Cosmo-SkyMed 高分辨率 InSAR 以及2014年 Sentinel-1 A/B 等。InSAR 的国际监测研究计划包括1995年地球空间科学研究委员会的星载 SAR;目前地位及今后发展方向计划、2003年欧洲委员会和欧洲航天局的全球环境安全监测、2004年中国政府-欧洲航天局的龙计划、2004年全球综合地球观测系统和2014年的 Sentinel-1A 等。

1989年,在 InSAR 的基础上发展起来的差分合成孔径雷达干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)技术在地表形变监测中发挥巨大作用,D-InSAR 从干涉结果(包含目标区域地形和形变等信息)中进一步去除地形信息,从而得到地面目标 mm 级形变信息的技术。D-InSAR 具有高形变敏感度、

高空间分辨率等突出的技术优势,是一种基于面观测的空间大地测量新技术,可补充已有的基于点观测的低空间分辨率大地测量技术(如全球定位系统(global positioning system, GPS)、甚长基线干涉和精密水准等)的不足。由于传统的 D-InSAR 技术仍存在空间、时间失相干和大气非均匀等问题,因而难以真正实用化。以永久散射体干涉(permanent scatterer, PS)InSAR 为代表的单一主影像时间序列 InSAR 技术^[3]和小基线集(small baseline subset, SBAS)InSAR 技术的多主影像时间序列 InSAR 技术^[4]是对传统 D-InSAR 技术的革新,能够有效降低去相干影响以及减弱大气延迟引起的误差组分并在多区域沉降监测领域得到大量应用。目前国内外 InSAR 技术方法研究主要包括方位向偏移(azimuth offset, AZO)^[5]、D-InSAR + AZO^[6]、相干目标法^[7]、多图像几何视角 InSAR^[8]、D-InSAR + 多孔径干涉(multi-aperture interferometry, MAI)^[9]、临时相干点(temporarily coherent point, TCP)-InSAR^[10]和 Tomo-PSInSAR^[11],此外还有 InSAR 应用中去大气影响、SAR 层析成像(SAR tomography)等新技术方法组合应用。未来 InSAR 技术发展方向将是组网、编队 InSAR,高分辨率、大幅宽、多极化 InSAR,双/多(天线)基线 InSAR,多波段 InSAR,阵列 SAR,小型化、轻型化以及 InSAR 图像超分辨率等。

1.2 InSAR 技术与 GRACE 卫星结合

地球重力场反映了由地球各圈层相互作用引起的物质空间分布、运动和变化。稳态地球质量分布决定了平均地球重力场,非稳态的质量分布将导致地球重力场随时间变化。2002年3月 GRACE 卫星成功发射,开创了高精度全球重力场观测与气候变化试验的新纪元。GRACE 工作原理是质量的运动会引起重力场的时变,GRACE 计划监测地球各圈层物质迁移,监测地球重力异常,监测地球大地水准面变化进行地下水储量反演,应用于陆地水储量观测、洪涝监测、海平面上升、地下水动态监测、冰川融化、干旱监测等全球气候与环境的各个方面,为获取全球尺度地球表层物质迁移和重新分布过程提供了直接观测手段,对监测全球环境和气候变化具有重要意义。利用 GRACE 卫星时变重力场模型反演所得地表质量变化主要是陆地水储量变化,陆地水是人类社会发展的不可替代的自然资源,国内外学者针对陆地水储量变化反演取得了许多突出研究成果,如 Wahr 等^[12]给出了利用 GRACE 数据反演陆地水储量变化的基本理论和方法;Tapley 等^[13]首先采用 GRACE 时变重力场模型成功监测亚马孙流域陆地水储量季节性变化;Rodell 等^[14]采用长时间沉降量

与 GRACE 监测的地下水变化具有极高的相关性,因此可以根据 GRACE 反映的地下水的变化与累积沉降量的相关关系进行空间的降尺度,以提高 GRACE 数据反映地下水的空间分辨率^[15]。基于上述研究成果,多时相 InSAR 技术获取地面沉降形变场,GRACE 卫星时变重力场模型反演所得地表质量变化主要是陆地水储量变化,地下水变化与地面沉降息息相关,InSAR 和 GRACE 技术结合是研究地下水变化对地面沉降影响的全新手段。GRACE 发现大区域-多尺度质量变化趋势,支持建立大区域水文模型,研究地下水储量变化,识别区域水循环变化过程,有效识别多尺度水文地质体动态特征。目前 InSAR-GRACE 卫星研究地表形变已经初见成效,多集中于地下水储量变化与地表形变量的相关关系和空间分布上^[15-16];未来与高光谱卫星影像的融合将为研究区域地下水位变化引起的负荷效应与地表形变效应、多尺度大区域水文变化与重力变化的关系等研究提供更广阔空间。

利用 InSAR-GRACE 卫星的地下空间演化的地表响应与城市地下空间安全研究框架如图 1 所示。

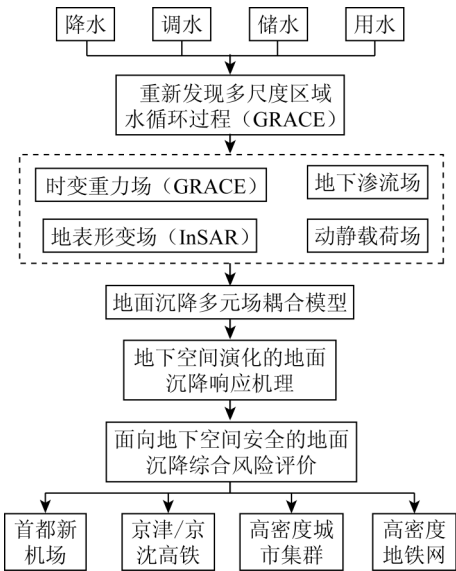


图 1 研究流程

Fig. 1 Research flow chart

新水情背景下,区域降水、调水、储水、用水结构都将发生显著变化。利用 GRACE 卫星平台重新发现区域水循环变化过程,所提取的时变重力场和地下渗流场与基于 InSAR 技术获得的地表形变场,以及地下空间动静载荷场共同建立多元场耦合模型;发现人为和自然双重影响下地面沉降多元场驱动机制,实现地面沉降机理地上、地下一体化研究。在此基础上,建立覆盖重点沉降地区监测网络,对地下空间高速开发带来的风险进行专

业评价,研究预警与应急管理、城市安全、防灾减灾等领域的技术开发和成果转化,为经济社会发展和风险管控提供可靠保障。

2 重新发现多尺度区域水循环过程

京津冀地区长期非科学开采地下水和高密度城市群的快速建设,强烈干扰和改变着区域水循环过程,而区域水循环控制着区域地面沉降演化。目前京津冀地区已形成全球最大的“地下水漏斗”区,区域地面沉降、塌陷、地裂形成的风险链、灾害链,区域地下水可开采资源枯竭和水环境恶化都严重威胁到城市集群安全。2019 年我国已经建成国家地下水监测工程(自然资源部中国地质调查局)。与此同时,截至 2019 年,南水北调中线工程运行已经 5 a。伴随着南水北调和供水水源结构变化的是地下水压限采行动计划,南水北调中线工程是对区域地下水的有效补给,自备井压采使地下水开采量相对减少,以期提高地下水涵养功能,实现地下水超采区生态地质环境的恢复和地面沉降的有效控制^[17]。未来重新发现多尺度区域水循环过程,对于区域水循环过程在流域尺度、区域尺度、城区尺度进行水资源管理,对多尺度水循环过程、地下水系统响应过程进行充分发掘。结合 InSAR 和 GRACE 等新兴遥感技术,对京津冀地区的降水、调水、储水、用水数据进行研究,建立京津冀地区多尺度地下水储量时变重力场,精确识别地面沉降动态水文地质体及其水循环模式。新水情背景下,可对地下水水位变化量和地面沉降量关系进行研究,不同地下水开采方案下的地面沉降响应过程,模拟分析地面沉降的不均匀性和滞后性并挖掘时空特征,优化抗浮水位设计以及地下水渗流场等。充分发挥 InSAR-GRACE 的技术优势,在时间、空间、光谱、重力多分辨率层面,从空中、地面、地下数据系统监测全过程,以达到网络准同步性,获取区域地表动态形变场、区域水文地质体的时变重力场,并集成城市快速发展过程中形成的浅表层动静载荷应力场、区域地下水渗流场等,建立区域地面沉降的多元场耦合模型,揭示区域地下空间演化的地表响应的演化规律和调控机理。

3 地面沉降深化研究——地下空间演化的地表响应

地下空间作为一种新型资源,是城市立体化开

发的有效途径,在功能上是地面空间的补充和完善。所谓地下空间是地表土地资源的地下延伸,指在岩层或土层中天然形成或人工开挖形成的空间^[18]。城市规划区内地表以下的近代的地下空间源自于1870年地铁出现,至20世纪,随着地下管廊、地下爆破等多元研究日趋成熟,“地下空间(underground space)”这一概念正式提出,并首先用于明尼苏达州的地下空间规划中,随后芬兰、日本、加拿大和新加坡等国家开展地下空间规划实践。

快速城市化与人口高密度化并行,人地矛盾及空间需求增加,为拓展城市空间,除了建设高层建筑以及远郊发展建设卫星城镇外,城市地下空间开发成为必然趋势。地下都市、地下交通网络规划和地下市政设施防灾设施的建设,使地下空间利用程度不断提高,工程建设引发的地面沉降问题也逐渐显现。逐渐有学者开展对地下空间的安全建设以及地下空间开发利用的评估等方面的研究。李永树等^[19]认为地下非层状(即不规则形状)空间环境是一种普遍存在的情况,与层状空间环境的地面沉降机理不同,他确定了非层状地下空间环境条件下地面沉降预测模型中的预测参数,对地面沉降进行了合理预测。在此基础上,地面沉降程度成为评价地下空间是否适宜开发的依据^[20-21]。近年来,地下空间开发利用在缓解“大城市病”和保障城市高速发展中起到重要作用,同时也改变了原有的地质结构,可能加剧地面沉降等地质灾害问题。地下空间开发利用(地铁、地下管线、地下水库等),叠加新水情下的水循环系统,形成新的局部驱动场,新驱动场与区域地质结构场叠加和相互作用可以揭示变化环境条件下地面沉降差异性演化过程与机理,最终达到对新兴风险预警与城市地下空间安全综合评估的目的。

3.1 多元场耦合模型与调控

区域沉降由高强度地下水开采、高密度城市群、立体交通网络、地下空间开发等多元场共同作用。地下空间演化的沉降响应是从研究区域地面沉降多尺度多场耦合与演化机理到建立地面沉降防控机制的思路。多元场耦合模型是一个开放的理论框架。首先构建从单元体到复合统一体(多孔介质水文地质体、城市体、地面沉降体、地下水降落漏斗体、综合数据体),由单一场到动态统一场(水文地质结构场、地下水渗流场、地面形变场、区域重力场、动静荷载应力场、综合数据场)的空间耦合关系;将动态统一场综合为背景场(多孔介质水文地质结构场)和

目标场(对沉降区多孔介质水文地质体发生作用影响的所有场)。根据区域多孔介质地面沉降时间过程,通过多场迭代和耦合叠加,解耦合模型中某一特定场对各复合场的控制方程,求得沉降变量空间分布。该模型通过描述各个物理场的数理方程的耦合项实现多元场耦合,通过多元场(子集)耦合、互馈,揭示区域地面沉降机理。地面沉降多元耦合模型运用数学物理方法,对比地下空间开发利用前后地面沉降的强度频率、梯度、季节年际变化等,阐明地下空间演化背景下区域地面沉降差异演化过程,目标场多尺度的地面沉降监测信息。基于大数据背景,进行数据挖掘,对地面沉降的监测技术、机理和调控进行研究,并对地下空间识别技术和应用进行探讨。

3.2 地下空间演化的地面沉降响应机理

空间水循环模式应是大气水汽、重力场(水储量)、渗流场、应力场、地表形变场共同影响;形变场亦是受重力场、渗流场、应力场的影响。这种多元场互馈机制影响下的地面沉降多元耦合模型是集模拟、评价、预报、规划、优化于一体的综合模型。地下空间开发利用,改变区域水循环,新的区域地面沉降差异性演化过程和机理需要新的研究手段和方法。因此,联合野外地面沉降监测站、测地雷达、电磁、人工地震、车载移动测量系统、InSAR 和 GRACE 等技术,创建地面沉降多元场耦合模型,开展地下空间演化的地表响应过程分析,分析时变重力场、动静载荷场、地下渗流场(含水层和弱透水层)和地表形变场的变化,以期获取时间序列背景场(地下空间利用前地面沉降形变场)、演化背景场(地下空间开发后地面沉降形变场)、目标场(地下空间利用、地下水压采系统及其影响区构成的地面沉降形变场)的监测信息;基于机器学习、数据挖掘等技术,发现多元场作用下地下空间开发的地面沉降中心演化过程,量化分析两者叠加效应、极值效应与作用机制,揭示地下空间演化背景下地面沉降多元场互馈作用机理和差异性响应机制。针对城市浅地表空间和地下空间利用建立风险评价指标体系,进行面向地下空间安全的地面沉降综合风险评价,为区域地面沉降防控和地下空间风险管理提供技术支撑。

3.3 面向地下空间安全的地面沉降综合风险评价

环境变化的脆弱性不仅是环境自身变化的结果,而且与人类的社会、经济发展和制度环境有直接关系,人类的活动提高了风险的不确定性。在日益增长的全球化趋势下,现代风险逐渐超出传统的界限,呈现出复杂性、相互伴生性、不可想象性、不可预

见性和不确定性等新特征^[22]。新兴风险的新特征对传统风险管理工具和技术等已经构成了严峻的挑战,我们现有的风险管理工具和技术已经无法应对越来越复杂的新兴风险,当前对风险理论、防灾减灾技术、新兴技术风险、城市安全与工程风险、预警与应急技术、城市安全与灾害智能预警等都迫切需要深入研究。

地下空间开发利用在保障城市高速发展中起到了重要作用,同时也改变了原有的地质结构;区域水循环系统的强烈变化,打破了区域地面沉降的原有的动态平衡,这成为影响城市安全的新兴风险。沉降中心的空间转移、新沉降中心的形成演化、新的缓冲-影响区的演化趋势,需要研究新技术、新方法的集成与优化,进行面向地下空间安全的新兴风险评价及探索适合预测未来沉降的模型,对全面提升大都市灾害风险防范能力和水平,保证社会经济可持续发展意义重大。

综合考虑区域地质、水文地质环境、人类活动、地下空间利用现状对承灾体风险进行识别,分析沉降区承灾体易损性、承灾能力、价值损失及可接受风险水平,结合区域孕灾环境、致灾因子和承灾体的特征,进行地面沉降与地下空间安全综合风险评估,完成对极端天气事件(区域性雨洪、干旱等)的捕捉,包括演变尺度和过程跟踪,实现对灾害发生从监测到预报,到监测与预报监测互馈^[23]。在此基础上,根据重大工程运行风险评价等级,建立面向重大工程运行风险的、多目标约束的地面沉降调控模型,满足地下水最大允许开采量、最小水位降深、重大工程运行最小风险等需求,建立地面沉降综合防控措施,为重大工程(京津、京沈高铁和首都新机场等)防灾减灾提供了科学依据,代表本领域新的研究趋势。

4 展 望

InSAR-GRACE 卫星获取的地面沉降形变场、重力场和地下水渗流场、水文地质结构场、动静荷载应力场校正协同,创建多元场耦合模型,对地面沉降机理进行地上、地下一体化研究,即地下空间演化的地表响应研究,建立地面沉降综合风险评价模型,最终实现面向地下空间安全的地面沉降新兴风险预警与城市地下空间安全评估。未来利用 InSAR-GRACE 技术以及机器学习方法,综合地下探测技术、水动力学理论,对地下空间演化的地表响应以及新兴风险的研究将集中在以下方面:

1) 在新水情的背景下,重新发现区域水循环规律,揭示地下水位变化带来的地面沉降不均匀性和滞后性的空间特征。

2) 整合优化 InSAR 地表沉降形变场、GRACE 时变重力场、集成浅表层动静载荷和地下水渗流场数值演化模式,建立优化京津冀地下空间开发的地面沉降响应模型,量化分析多层含水层-地下空间演化对地面沉降的叠加效应与作用机理。

3) 由地面沉降地下监测系统,地面移动测量系统、全景影像三维量测与建模系统、天基遥感数据获取与处理系统集成天基-地基-地下监测协同校正系统,通过 cm 甚至 mm 级协同校正,实现多孔介质地面沉降区域多尺度、变分辨率(非线性过程映射、水平形变)多场数据高精度同化,形成区域标准系统,实现地面沉降监测预测一体化。

参考文献 (References):

[1] 自然资源部中国地质调查局. 三位一体监测网实时监控华北地面沉降[EB/OL]. (2015-04-13)[2019-12-12]. http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201603/t20160309_299270.html.
China Geological Survey Bureau, Ministry of Natural Resources. Real time monitoring of land subsidence in North China by Trinity monitoring network[EB/OL](2015-04-13)[2019-12-12]. http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201603/t20160309_299270.html.

[2] Zhang Y Q, Gong H L, Gu Z Q, et al. Characterization of land subsidence induced by ground water withdraws in the plain of Beijing City, China[J]. Hydrogeology Journal, 2014, 22(2): 397-409

[3] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.

[4] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 40(11): 2375-2383

[5] Rémi M, Avouac J P, Taboury J. Measuring near field coseismic displacements from SAR images: Application to the Landers earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(19): 3017-3020.

[6] Fialko Y A, Rubin A M. Thermal and mechanical aspects of magma emplacement in giant dike swarms[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(b10): 23033.

[7] Usai S. A least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential SAR interferometry[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2002.

[8] Wright T J, Parsons B E, Lu Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(1): L01607.

[9] Bechor N B D, Zebker H A. Measuring two-dimensional move-

ments using a single InSAR pair[J]. Geophysical Research Letters,2006,33(16):L16311.

[10] Zhang L,Lu Z,Ding X,et al. Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin[J]. Remote Sensing of Environment,2012,117(1):429 – 439.

[11] Ma P,Lin H. Robust detection of single and double persistent scatterers in urban built environments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(4):2124 – 2139.

[12] Wahr J,Molenaar M,Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field:Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,1998,103(b12):30205 – 30229.

[13] Tapley B D,Bettadpur S,Ries J C,et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science,2004,305(5683):503 – 505.

[14] Rodell M,Velicogna I,Famiglietti J S. Satellite based estimates of groundwater depletion in India[J]. Nature,2009,460(7258):999 – 1002.

[15] 张铁勤,何祺胜,荆琰琳,等. 基于 InSAR 的北京市平原区地下水动态监测[J]. 科学技术与工程,2019,19(12):16 – 22.

Zhang T Q,He Q S,Jing C L,et al. Dynamic monitoring of groundwater in the plain area of Beijing based on InSAR[J]. Science Technology and Engineering,2019,19(12):16 – 22.

[16] 宫辉力,李小娟,潘云,等. 京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律[J]. 中国科学基金,2017,31(1):72 – 77.

Gong H L,Li X J,Pan Y,et al. Groundwater depletion and regional land subsidence of the Beijing – Tianjin – Hebei area[J]. China Science Foundation,2017,31(1):72 – 77.

[17] 程凌鹏,范子训,王新惠,等. 南水进京后典型区域地下水与地面沉降新动态[J]. 人民黄河,2018,40(7):82 – 87.

Cheng L P,Fan Z X,Wang X H,et al. New trend of groundwater and land subsidence in typical areas after the south – to – north water transfer into Beijing[J]. Yellow River,2018,40(7):82 – 87.

[18] 王永立. 天津市中心城区地下空间资源评价[J]. 地球科学与环境学报,2008,30(2):166 – 171.

Wang Y L. Evaluation of underground space resources in downtown Tianjin[J]. Journal of Geosciences and Environment,2008,30(2):166 – 171.

[19] 李永树,肖林萍. 地面沉降预测参数的变化规律与计算方法[J]. 西南交通大学学报,2006,41(4):424 – 428.

Li Y S,Xiao L P. Change rule and calculation method of land subsidence prediction parameters[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2006,41(4):424 – 428.

[20] 柳昆,彭建,彭芳乐. 地下空间资源开发利用适宜性评价模型[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(2):219 – 231.

Liu K,Peng J,Peng F L. Suitability evaluation model of underground space resources development and utilization[J]. Journal of Underground Space and Engineering,2011,7(2):219 – 231.

[21] 刘健,魏永耀,高立. 苏州城市规划区地下空间开发适宜性评价[J]. 地质学刊,2014,38(1):94 – 97.

Liu J,Wei Y Y,Gao L. Suitability evaluation of underground space development in Suzhou urban planning area[J]. Journal of Geology,2014,38(1):94 – 97.

[22] 胡杨. 国际风险管理理事会 (IRGC) 2005 年北京年会综述[J]. 中国软科学,2005(10):157 – 160.

Hu Y. Summary of IRGC 2005 Beijing annual meeting[J]. China Soft Science,2005(10):157 – 160.

[23] 王琳,李迅,包云轩,等. 遥感技术在交通气象灾害监测中的应用进展[J]. 国土资源遥感,2018,30(4):1 – 7. doi:10. 6046/gtzyyg. 2018. 04. 01.

Wang L,Li X,Bao Y X,et al. Research progress of remote sensing application on transportation meteorological disasters[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(4):1 – 7. doi:10. 6046/gtzyyg. 2018. 04. 01.

Emerging risks and the prospect of urban underground space security based on InSAR – GRACE satellite under the new hydrological background

YU Hairuo^{1,2,3,4,5,6,7}, GONG Huili^{1,2,3,4,5,6,7}, CHEN Beibei^{1,2,3,4,5,6,7}, ZHOU Chaofan^{1,2,3,4,5,6,7}

(1. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. The Key Lab of Resource Environment and GIS of Beijing, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 5. Key Laboratory of Mechanism, Prevention and Mitigation of Land Subsidence, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 6. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 7. Observation and Research Station of Groundwater and Land Subsidence in Beijing – Tianjin – Hebei Plain, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: Regional surface subsidence caused by the development and use of urban underground space is a major hazard endangering the safety of Beijing – Tianjin – Hebei city cluster. This paper briefly reviews the development history of interferometric synthetic aperture Radar (InSAR) technology, systematically summarizes the progress of applying gravity recovery and climate experiment (GRACE) satellite in underground water reserve, illustrates

multiple factors containing subsidence , and finally ascribes the subsidence to multiple fields of underground space . Under the new hydrological background of the interaction between South - to - North Water Diversion and mining of underground water , InSAR - GRACE technology is a brand - new means for studying the impact of underground space evolution on land subsidence . Based on InSAR - GRACE technology , this paper rediscovers the regional water circulation laws , quantifies the contribution of multiple fields to subsidence evolution , proposes the surface response research framework for the evolution of underground space , and reveals the formation mechanism on the surface subsidence response model , thereby establishing an emerging risks prevention and control early warning mechanism for underground space security and realizing scientific regulation and control of the region .

Keywords: InSAR - GRACE ; underground space evolution ; land subsidence response ; multiple field interaction ; regulation mechanism

(责任编辑: 张 仙)