

李玉梅, 罗勇, 赵龙. 北京市平原区地面沉降研究进展与思考[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 121–126. [LI Yumei, LUO Yong, ZHAO Long. The Advance and Considerations on Land Subsidence in Beijing Plain [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(4): 121–126. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.020.]

# 北京市平原区地面沉降研究进展与思考<sup>\*</sup>

李玉梅<sup>1,2</sup>, 罗勇<sup>3</sup>, 赵龙<sup>3,4</sup>

(1. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;  
2. 中国地震局发展研究中心, 北京 100036; 3. 北京市地质环境监测所, 北京 100195;  
4. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

**摘 要:** 分析北京地面沉降多年研究成果, 对地面沉降的形成与发育历史、监测技术、影响因素、地下水开采与地面沉降间关系及南水北调中线工程运行(南水进京)对地面沉降的影响等方面进行探讨。近年来, 地面沉降监测技术方法研究更加注重新技术新方法的应用, 其中 InSAR 和分布式光纤技术的应用极大的提升了地面沉降监测的覆盖度及实时获取能力。通过对应用成果的分析, 发现不科学的地下水开采是造成地面沉降的主要原因, 而南水进京对控制地面沉降快速发展具有积极作用。目前北京平原区同时存在地表回弹和地表下沉双重影响, 因此两因素叠加对区域地质安全的影响仍然是未来需要持续关注的问题。

**关键词:** 地面沉降; 地下水开采; 监测技术; 南水北调; 北京平原

**中图分类号:** X43; X915.5; P642.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)04-0121-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.020

地面沉降是一种受多种复杂因素制约和影响的缓变性地质灾害<sup>[1]</sup>, 既受深部构造, 又受中深层人类活动的影响, 同时叠加浅部地表互渗响应<sup>[2-3]</sup>。据统计, 目前世界上已有近 34 个国家, 超 200 个地区正遭受地面沉降灾害的威胁<sup>[4]</sup>。大量调查结果表明, 地面沉降灾害主要表现为: ①对基础设施的破坏, 如管道、建筑物和水坝<sup>[3]</sup>; ②影响轨道平顺性<sup>[5]</sup>; ③增加洪涝的风险<sup>[5]</sup>; ④导致地下水污染<sup>[5]</sup>。

围绕地面沉降这一科学问题联合国教科文组织、国际水文科学协会等团体开展了一系列国际研究计划, 并以此为专题连续召开了十届国际学术会议<sup>[6]</sup>, 共同探讨地面沉降监测、成因机理及防治方面问题, 并取得了大量研究成果。当前, 该领域的成果主要集中在地面沉降驱动因素的定量识别<sup>[7-8]</sup>、多目标约束下的数值模拟<sup>[9-10]</sup>、与地面沉降的衍生灾害研究<sup>[11-12]</sup>和控沉目标下的水资源管理等方面。随着研究程度的深入, 更多的新技术、新方法涌现, 并应用于地面沉降监测和预警预报中<sup>[2,13]</sup>。

北京市是一个严重缺水的国际化大都市。根据北京市水资源公报统计显示, 北京市人均水资源占有量低于 300 m<sup>3</sup>, 不足全国平均水平的 1/8, 低于国际公认的人均 1 000 m<sup>3</sup> 的缺水警戒线<sup>[14]</sup>。水资源供给是限制地区经济发展的主要矛盾, 为解决上述矛盾, 北京市建立应急水源地, 开采地下水成为供水水源, 缓解水资源供需矛盾<sup>[15-16]</sup>。但随着城市规

模的扩大和经济的发展, 对水资源的需求不断增长, 连续近 40 年的过量开采地下水, 已经导致北京平原区地下水水位大幅度下降, 地下水资源大量亏空, 并引发了严重的地面沉降问题<sup>[16-18]</sup>。

为解决地面沉降造成的地质环境问题, 北京市水文地质工程地质大队建立了地面沉降立体监测网, 众多学者基于该监测网监测成果, 围绕北京地面沉降问题开展了深入调查、监测、研究和防控工作, 在地面沉降演化特征、成因机制、防控技术等方面有了新进展, 尤其在南水进京(2015 年至今)阶段进行了大量研究。通过使用数值模拟、InSAR 及机器学习等手段揭示了南水利用的短期效应, 包括对地下水环境改变<sup>[19-20]</sup>、地面沉降发育模式<sup>[21]</sup>、土体变形特征及各参数的演变<sup>[22]</sup>等。本文基于北京地面沉降多年研究成果, 对北京市平原区地面沉降发育特征、地面沉降信息获取手段、成因机制进行综述和探讨, 并对未来研究方法进行展望。

## 1 地面沉降发育历史及现状

北京平原区地面沉降最早形成于北京西单至东单一带, 并记录于文献[23]中。北京市水文地质工程地质大队长序列监测结果表明, 地面沉降发育共经历了四个阶段, 分别为发展阶段(1973—

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2023-03-06

修回日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42102235); 中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA2121)

第一作者简介: 李玉梅(1987-), 女, 汉族, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 工程师, 主要从事第四纪地质灾害研究。E-mail: ymli@neis.cn

通信作者: 赵龙(1990-), 男, 汉族, 黑龙江鹤岗人, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究。E-mail: 3105220001@email.cugb.edu.cn

1983 年)、扩展阶段(1983—1999 年)、快速发展阶段(1999—2014 年)和沉降减缓阶段(2014—2020 年)<sup>[24]</sup>。新中国以来,地面沉降首先在东郊地区形成并迅速发展,截至 1966 年,北京总沉降区面积为 400 km<sup>2</sup><sup>[25]</sup>。到 1982 年,该面积增加 600 km<sup>2</sup>,并形成了大郊亭和来广营两个地面沉降中心<sup>[25]</sup>。1983—1999 年,在平原区北部(昌平区沙河—八仙庄地区、顺义区平各庄),平原区东部(通州区徐辛庄)及平原区南部(大兴区礼贤—榆垓地区)先后形成了多个新的地面沉降中心<sup>[25]</sup>。截至 1999 年,北京市沉降区面积已达到了 2 815 km<sup>2</sup><sup>[25]</sup>。1999—2014 年,地面沉降快速发育,使得新的沉降中心陆续出现,形成了平原区东部、北部、南部 3 个沉降大区,此时北京市沉降区发育为 7 个沉降中心的格局。随着南水利用叠加地下水压采、限采、自备井关停等一系列政策的实施,2015—2020 年北京平原区地面沉降发育出现减缓现象,北京市主要沉降中心沉降速率均呈减缓趋势,特别是平原区北部和东部几大沉降中心,沉降速率减缓较为显著。截至 2020 年,7 个沉降中心中仅朝阳金盏沉降中心沉降速率超过 50 mm/a<sup>[26]</sup>。

## 2 地面沉降监测技术的发展与应用

### 2.1 地表监测技术

#### 2.1.1 水准测量和 GPS

北京地区自 20 世纪 60 年代开始重视地面沉降的监测,最初使用的是水准测量方法,地面沉降水准网建设一直是北京市主要地面沉降区的常规监测手段之一<sup>[27]</sup>。为提升地面沉降监测精度,满足持续监测北京平原区地面沉降的需求,北京市水文地质工程地质大队基于地面沉降预警预报一期、二期工程,进行了地面沉降水准监测网的建设及优化。雷坤超等<sup>[28]</sup>基于水文地质单元分区、地下水位下降速率、可压缩层总厚度因素,划分地面沉降综合影响分区,并实现了水准网优化;随后 LUO 等<sup>[29]</sup>深入分析地面沉降影响因素,并提出了地面沉降单元理论,并依据该理论对现有水准网进行优化,优化后的水准网可精准覆盖重点沉降区及重大工程建设区为北京城市规划及重大工程安全运营提供技术保障。而 GPS 测量因为其空间分辨率低,主要用于地表点状信息监测(沉降中心地区或差异沉降严重地区)<sup>[30]</sup>。相比于垂向形变监测精度,GPS 的水平形变监测精度要高出 2 ~ 3 倍,可有效捕获土体水平变形信息。LEI 等<sup>[31]</sup>利用 GPS 水平形变监测精度高的优势,获取了北京地面沉降区水平形变特征,与地下水漏斗图叠加发现, GPS 点水平运动方向总体指向地面沉降或地下水位降落漏斗中心,或由高水位指向低水位地区。目前研究多致力于应用 GPS 监测地表垂向应变,这对于均匀地表下沉区监测较为有效,但对于差异沉降地区,土体差异性下沉可能导致地表出现水平形变,这也是导致地表开裂的一个主要原因<sup>[17]</sup>,因此在此区域应该进一步发挥 GPS 高精度水平监测优势,优化 GPS 空间布局。

#### 2.1.2 InSAR

使用 InSAR 监测北京平原区地表形变的首次文献报道要追溯到 2009 年, ZHANG 等<sup>[32]</sup>利用 PS - InSAR 技术监测北京潮白河地区地面沉降。随后学者们基于不同源的 InSAR 影像对北京平原进行地面沉降监测(表 1),据统计发现,北京平原近年

来所使用的数据源主要有 5 种,分别为 ENVISAT ASAR、ALOS - 1 PALSAR、TerraSAR - X、Sentinel - 1 和 Radarsat - 2。例如 NG 等<sup>[33]</sup>利用 44 张 ENVISAT SAR 影像和 24 张 ALOS - 1 PALSAR 影像,获取 2003—2009 年北京市地表形变速率;宫辉力等<sup>[34]</sup>利用 ENVISAT ASAR 影像数据监测了北京平原区 2003—2006 年的地面沉降;CHEN 等<sup>[35]</sup>利用 ENVISAT SAR 影像和 TerraSAR - X 影像对北京地区的地表变形进行了研究,发现北京东部地区沉降最大,速度超过 100mm/a。ZHU 等<sup>[36]</sup>利用 ENVISAT SAR 影像,揭示了 2003—2010 年地面沉降的时空特征。

表 1 InSAR 技术在北京地区地面沉降研究中的应用

解译方法	数据源	参考来源
Geos—PS—InSAR	ENVISAT ASAR ALOS—1 PALSAR	NG 等 <sup>[33]</sup>
Quasi—PS—InSAR	TerraSAR—X/TanDem— X (TSX/TDX) SAR	GUO 等 <sup>[37]</sup>
WabInSAR	ENVISAT ASAR TerraSAR—X	GAO 等 <sup>[38]</sup>
GEOS—SBAS	Sentinel—1 Radarsat—2 ALOS—1 PALSAR	DU 等 <sup>[39]</sup>
MMTI—TSF	ENVISAT ASAR TerraSAR—X	DUAN 等 <sup>[40]</sup>
PS—InSAR	ENVISAT ASAR	陈蓓蓓等 <sup>[41]</sup>
	ENVISAT ASAR TerraSAR—X	YANG 等 <sup>[42]</sup>
	Sentinel—1 ENVISAT ASAR Radarsat—2	LYU 等 <sup>[43]</sup>
	ENVISAT ASAR Radarsat—2	YU 等 <sup>[44]</sup> LI 等 <sup>[45]</sup>
SBAS—InSAR	ENVISAT ASAR	DUAN 等 <sup>[46]</sup>
	ENVISAT ASAR RADARSAT—2	ZHOU 等 <sup>[47]</sup>
	Sentinel—1	HU 等 <sup>[48]</sup>
	Sentinel—1 Radarsat—2	CHEN 等 <sup>[49]</sup>
	ENVISAT ASAR TerraSAR—X	CHEN 等 <sup>[35]</sup>
	ENVISAT ASAR TerraSAR—X	CHEN 等 <sup>[50]</sup>
	Sentinel—1	GUO 等 <sup>[14]</sup>
	ENVISAT ASAR Radarsat—2	GUO 等 <sup>[37]</sup>
	Sentinel—1 Radarsat—2	GUO 等 <sup>[51]</sup> LIU 等 <sup>[52]</sup> ZHANG 等 <sup>[53]</sup>

目前主流的 InSAR 解译方法主要为差分干涉测量短基线集时序分析技术(Small Baseline Subset InSAR, SBAS - InSAR)和永久散射体合成孔径雷达干涉测量(Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS - InSAR)。相比之下由于 PS - InSAR 技术对点密度要求高,所需 SAR 影像量较大<sup>[30]</sup>,而 SBAS - InSAR 技术则可以在数据量较少的情况下,尽可能多地获取到观测值的个数<sup>[30]</sup>。此外,还有 Quasi - PS 技术,该技术是一

种先进的 PS-InSAR 方法,它能够只使用少量与目标相关的干涉图子集来估计目标的高度和位移<sup>[54]</sup>。GAO 等<sup>[55]</sup>利用 TerraSAR-X/TanDEM-X 影像数据集结合 Quasi-PS-InSAR 技术,监测了 2010—2017 年的首都机场地表形变并识别出机场跑道存在明显的差异沉降。基于小波分析的 InSAR 处理技术(WabInSAR)在一定的垂直基线内使用多组干涉图,类似于 SBAS 方法。WabInSAR 技术通过检查数据集的复杂干涉相位噪声,实现一种统计方法来识别噪声较小像素,通过执行各种基于小波的滤波器,以减少地形、轨道误差和相关大气延迟的影响<sup>[55]</sup>。GAO 等<sup>[55]</sup>利用 ENVISAT ASAR 和 TerraSAR-X 两个影像数据集,基于 WabInSAR 技术,对 2003—2013 年北京平原区地表变形进行了研究。

上述分析表明,目前研究多致力于通过长时序、多平台数据获取地面沉降信息,但通过多平台数据建立有效的长时序监测信息仍是当前研究的热点。此外,对于后向散射能量较低的区域,获取的沉降信息时空分辨率较低。如何进行地面沉降信息重建领域,弥补失相干现象造成的沉降信息缺失的问题,还有待研究和探讨。

## 2.2 垂向监测技术

### 2.2.1 基岩标—分层标和分布式光纤传感

基岩标是埋设在地下完整基岩上的特殊观测点,可以作为地面沉降测量的高程控制点。分层标是掌握不同深度土层变形信息最主要的手段,根据土层的性质,埋设在地下不同深度土层和含砂层中,是世界上公认的测量松散土层变形量的设施<sup>[56]</sup>。北京市水文地质工程地质大队在北京地面沉降中心区建设了 7 个地面沉降监测站(7 个基岩标和 55 个分层标)并应用于北京平原区地面沉降研究中。ZHANG 等<sup>[57]</sup>基于分层标监测结果,揭示了地面沉降主控层位;刘贺等<sup>[58]</sup>基于天竺地面沉降监测站 102 m 浅地层分层监测结果,揭示了地面沉降在垂向上的发育特征;CHEN 等<sup>[59]</sup>基于八仙庄、王四营和天竺三个监测站分层监测结果,分析了地下水与地面沉降滞后关系;LEI 等<sup>[60]</sup>基于北京平原建设完成的七个监测站的分层时序监测结果,分析了南水北调供水工程实施前后,各层地面沉降土体的变形特征。利用分层标监测方法监测北京地层垂向变形已经接近 20 年,尽管该方法可有效获取地表垂向变形信息,但仍存在如下问题:①北京地区分层标监测的是混合地层沉降信息即砂土和黏性土层,无法准确确定砂土层单层沉降量,无法深入分析地表回弹地区回弹机制。②分层标无法获取地层全断面变形信息,垂向分辨率较低,尽管可以满足地面沉降日常监测需要,但无法满足开展地面沉降原位试验。

### 2.2.2 分布式光纤传感

在过去几十年,分布式光纤传感(DFOS)技术已成功应用于监测地质结构变形和评估地质灾害严重程度<sup>[61-62]</sup>的研究中。通过与分层监测结果对比发现,该技术具有较强的适用性和应用前景。例如,ZHANG 等<sup>[63]</sup>基于分布式监测应变数据,采用运动学方法计算了滑坡的剪切位移,并将其应用于三峡库区发生的马家沟滑坡。WU 等<sup>[64]</sup>和 GU 等<sup>[65]</sup>利用 DFOS 对 200 m 深钻孔含水层变形进行监测,确定了苏州地区地面沉降的主控层。LIU 等<sup>[66]</sup>使用 DFOS 对天津地区一个 100 m 钻孔中地层的沉降进行了为期 2 年的监测,获得了有效且连续的变形地层及更为精细的沉降数据。

北京地区在 2016 年引入分布式光纤传感技术进行地面沉降监测工作,首先应用于北京城市副中心地面沉降变形的监测,随后在大兴国际机场和王四营地面沉降监测站陆续开展了试验性的监测工作。由于监测时间较短和后期被破坏的原因,当前仅有一篇文献进行报道,既李超等<sup>[67]</sup>应用直埋金属基索状应变感测光缆的方法对北京通州某地 112 m 松散层压缩变形进行了 1 年半的监测。其监测结果表明,监测地区松散层主要压缩层位为 5~30 m,该层位压缩量随着时间的推移和深度的加深有变小的趋势。

## 3 地下水开采与地面沉降间关系研究

地下水水位下降导致未固结含水层颗粒间压力增大,在这种非承压含水层中的压力增大主要来自于地下水水位下降导致的土体颗粒所受浮力消失,而在承压含水层中主要来自于水位下降导致的上部水力压力降低。同时,相关研究结果表明,不科学开采地下水是造成北京平原区地面沉降的主要原因<sup>[38,49]</sup>。针对北京地区地下水开采与地面沉降间关系,崔亚莉等<sup>[68]</sup>基于北京市八王坟实测地面沉降高程与月度地下水水位数据,结合相关性分析方法发现地面沉降的速率和幅度与地下水水位的下降呈明显的线性关系。随后大量研究人员探讨了地下水开采量与地面沉降的相关关系,均证实了北京市长期过量开采地下水造成地下水水位持续下降是引发地面沉降快速发展的主要原因<sup>[69-71]</sup>。但是上述研究均集中在沉降中心或已有沉降监测点等小范围内,随着技术的不断提高,多种卫星数据的有效融合,研究人员开始从空间大尺度分析地面沉降与地下水间关系。ZHU 等<sup>[36]</sup>应用遥感数据对北京平原区北部地面沉降研究发现,空间上沉降中心的分布与地下水降落漏斗分布一致。CHEN 等<sup>[50]</sup>系统分析了北京平原区地下水漏斗的动态变化和地面沉降响应过程,发现地面沉降对地下水漏斗的响应模式时空分布不均匀,存在季节和年际差异,尽管地下水漏斗与相应地面沉降漏斗的空间分布特征之间存在一致性,但这种一致性并不完全契合。LEI 等<sup>[72]</sup>采用永久散射体干涉合成孔径雷达(PS-InSAR)技术获取北京平原地区的地面沉降信息,同样发现地面沉降中心与地下水漏斗中心不完全一致。上述现象可能与黏性土层具有很强滞后性有关<sup>[73]</sup>。此外黏性土中结合水的存在,导致土体蠕变造成其滞后<sup>[74]</sup>。GAO 等<sup>[38]</sup>应用 InSAR 数据和地下水水位监测结果,结合小波分析,发现地面沉降发育滞后于地下水水位变化,滞后期为 8 个月。CHEN 等<sup>[49]</sup>采用连续小波变换(CWT)和交叉小波变换(XWT)的方法分析了地面沉降与地下水开采之间的时滞关系,得到了相似的结果。

研究表明,垂向上地面沉降主贡献层除与地下水水位开采变化有关,还与地层岩性组成有关。地层具有弹性、弹塑性、黏弹塑性和塑性变形特征,不同的变形特征对地面沉降发育模式具有显著影响。田芳<sup>[25]</sup>、LEI 等<sup>[75]</sup>对北京地面沉降区不同岩性在不同水位变化模式下的变形特征进行了总结,他们发现,同一土体随着地下水水位的变化表现出了不同的变形特征,不同深度的土体在不同的水位变化模式下,也表现出了不同的变形特征(表 2)。

表2 北京地面沉降区不同岩性在不同水位变化模式下的变形特征

岩性	变形类型	水位变化模式	变形特征
含水砂层	①	年均水位小幅下降	以弹性变形为主, 残余变形量很小
	②	年均水位总体呈持续上升, 年内水位下降速度低于上升速度。	以弹性变形为主, 回弹至初始水位对应的变形状态
黏性土层间夹薄层粉砂或(和)粉细砂组成的压缩层	①	年均水位基本稳定	前期以较快的速度压缩, 包含塑性变形和蠕变变形, 后期压缩速度渐缓, 塑性变形特征减弱, 表现出一定的弹性变形特征
	②	年均水位一直以较快速度持续下降	以较快的速度持续压缩, 未见减缓, 包含塑性变形和蠕变变形
	③	年均水位先持续下降, 后回升	水位持续下降阶段, 以较快速度持续压缩, 包含塑性变形和蠕变变形, 水位回升期间, 压缩速度减缓, 塑性变形特征减弱
	④	年均水位总体呈持续下降, 但前期下降速度快, 后期下降速度慢	不论水位下降速度是否减缓, 均以较快的速度在持续压缩, 包含塑性变形和蠕变变形
	⑤	年均水位总体呈持续下降, 但前期下降速度慢, 后期下降速度快	一直以较快的速度在持续压缩, 包含塑性变形和蠕变变形, 但前期有一定的弹性变形特征
	⑥	年均水位总体呈持续上升, 年内水位下降速度低于上升速度。	土层持续压缩, 压缩速度明显减缓。包含塑性变形和蠕变变形, 后期出现弹性变形特征。

#### 4 南水北调中线工程运行对地面沉降的影响

南水北调中线工程的运行(南水进京)对区域水循环的改变起到重要作用, 影响区域地面沉降演化规律<sup>[76]</sup>。2015年, 北京平原区地下水水位比1980年下降18.51 m, 储量减少94.8亿m<sup>3</sup>, 比1960年下降22.56 m, 储量减少115.6亿m<sup>3</sup><sup>[60]</sup>。近年来, 南水北调进京累计达到60亿m<sup>3</sup>, 累计压采地下水约39亿m<sup>3</sup>, 严重改变了区域水循环过程, 区域地面沉降进入新的动平衡阶段、呈现新的演化规律<sup>[60]</sup>。

研究人员针对南水进京(2015年至今)阶段内地面沉降特征进行了大量研究。ZHU等<sup>[77]</sup>分析了利用南水进行潮白河人工回补对区域地面沉降的影响, 他们发现通过地面沉降对含水层补给(MAR)产生了积极的反馈, 但仅限于局部规模。田苗壮等<sup>[78]</sup>分析发现潮白河地下水回补后第一、第二承压含水层水位分别回升25.49 m、25.6 m; 地表回弹范围与地下水上升区等水位线基本吻合; 随着地下水位逐年回升, 丰水期地面沉降减缓并发生回弹现象, 枯水期地面沉降速率明显减小。张双成等<sup>[79]</sup>利用升降轨时序合成孔径雷达干涉测量发现南水北调中线工程在一定程度上极大地缓解了北京的地面沉降扩张趋势。LYU等<sup>[43]</sup>分析了南水进京对北京地面沉降时空演化的影响发现, 南水进京虽然可以缓解地面沉降发育, 但地面沉降漏斗边缘的差异沉降却不断发展。DUAN等<sup>[46]</sup>研究了南水进京和气候因子对北京市地下水水位与地面沉降间的影响, 发现南水进京对地面沉降的贡献在2016—2018年间最为显现, 并证明南水进京在一定程度上缓解了北京平原区地面沉降灾害问题。CHEN等<sup>[49]</sup>对比了南水进京前后, 各层地下水的变幅对地面沉降的驱动作用, 发现第二承压含水层仍然对地面沉降发育起主要贡献, 但该贡献在南水进京后明显减少, 此外, 她们基于InSAR监测结果还发现南水进京后区域沉降面积和最大变形率显著降低, 且沉降中心的时间序列变形在南水进京后两年也呈下降趋势。LEI等<sup>[60]</sup>分析发现在南水进京影响下, 地下水位恢复滞后于

南水利用, 在2017年地下水水位出现回升。相应的土层变形特征出现显著差异, 含水层以弹塑性变形为主转为弹性变形; 隔水层从塑性变形和蠕变变形转变为粘弹塑性变形, 最终展现出弹性变形。

在南水进京导致地下水回升与地面沉降减缓互馈机制方面, 研究人员一般集中于地下水回升对地面沉降减缓作用的单效应分析, 然而缺少以地面沉降为约束条件的地下水回升水位及地下水回灌量的研究。在南水北调与控采回灌新水情、如何科学压采和科学回补, 达到有效减缓地面沉降的同时不引发次生灾害问题, 仍是现有研究中未涉及或未解决的问题。

#### 5 结论和展望

本文系统梳理了北京地面沉降发育、监测技术发展及成因机理方面的研究成果, 发现在地表监测技术上, InSAR技术在地表形变监测中具有显著的优势, 可基于多种数据源获取高精度地表形变信息, 满足不同的研究尺度和时间跨度的研究需求。在垂向监测技术上, 基岩标—分层标仍为主流监测手段, 且大量研究已表明该方法的有效性和适用性, 但光纤技术仍然是当前需要尝试使用的新技术, 对其适用性和精度的评估仍然是今后一段时间内需要开展的工作。

不科学开采地下水是造成北京平原地面沉降的主要原因。空间上地面沉降严重区与地下水降落漏斗区高度一致, 随着地下水漏斗减缓而减缓; 垂向上地面沉降主贡献层随地下水开采层位变化而变化; 但南水北调中线工程的运行(南水进京)强烈改变着区域水循环, 区域地下水水位上升, 极大地缓解了北京地区地面沉降的扩张趋势。

当前北京平原区遭受着地表回弹和地面沉降的双重影响, 地面沉降对北京平原区影响的研究较为丰富, 但针对地表回弹的研究却较少, 目前缺少详细刻画北京平原区地表回弹模型来进行研究和预测未来地表回弹可能会造成的一系列次生地质灾害的问题。此外, 南水进京后北京平原区各地地面沉降均有不同程度的减缓, 但使得差异沉降愈发明显, 差异沉降可对建(构)筑物、线性工程等产生严重影响, 但当前对差异沉降的研究

较少,对其发生机制和致灾模式等研究还鲜有报道,这些仍然是未来需要持续关注的问题。

## 参考文献:

- [1] 薛禹群,张云,叶淑君,等.我国地面沉降若干问题研究[J]. 高校地质学报,2006,12(2):153-160.
- [2] GALLOWAY D L, BURBEY T J. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(8): 1459-1486.
- [3] BAGHERI - GAVKOSH M, HOSSEINI S M, ATAIE - ASHTIANI B, et al. Land subsidence: a global challenge[J]. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146193.
- [4] HERRERA - GARCÍA G, EZQUERRO P, TOMÁS R, et al. Mapping the global threat of land subsidence[J]. Science, 2021, 371(6524): 34-36.
- [5] MA T, DU Y, MA R, et al. Review: Water - rock interactions and related eco - environmental effects in typical land subsidence zones of China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1339-1349.
- [6] 秦同春,程国明,王海刚. 国际地面沉降研究进展的启示[J]. 地质通报,2018,37(2):503-509.
- [7] LYU H M, SHEN S L, ZHOU A, et al. Risk assessment of mega - city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 135310.
- [8] ELMAHDY S I, MOHAMED M M, ALI T A, et al. Land subsidence and sinkholes susceptibility mapping and analysis using random forest and frequency ratio models in Al Ain, UAE[J]. Geocarto International, 2022, 37(1): 315-331.
- [9] SEKKERAVANI M A, BAZRAFSHAN O, POURGHASEMI H R, et al. Spatial modeling of land subsidence using machine learning models and statistical methods[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(19): 28866-28883.
- [10] AZARAKHSH Z, AZADBAKHT M, MATKAN A. Estimation, modeling, and prediction of land subsidence using Sentinel - 1 time series in Tehran - Shahriar plain: A machine learning - based investigation[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2022, 25: 100691.
- [11] AHMAD R, MAHDI K M, REZA D. Structural characteristics and formation mechanism of the earth fissures as a geohazard in birjand, Iran[J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4144.
- [12] TAY C, LINDSEY E O, CHIN S T, et al. Sea - level rise from land subsidence in major coastal cities[J]. Nature Sustainability, 2022, 5(12): 1049-1057.
- [13] RASPINI F, CALECA F, DEL SOLDATO M, et al. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis[J]. Earth - Science Reviews, 2022, 235: 104239.
- [14] 北京市水务局. 北京市水资源公报[R]. 北京:北京市水务局,2014-2020.
- [15] WANG Y X, ZHENG C M, MA R. Review: Safe and sustainable groundwater supply in China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1301-1324.
- [16] ZHOU Y, WANG L, LIU J, et al. Options of sustainable groundwater development in Beijing Plain, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2012, 47: 99-113.
- [17] ZHAO L, LI Y, LUO Y, et al. An extension - dominant 9 - km - long ground failure along a buried geological fault on the eastern Beijing Plain, China [J]. Engineering Geology, 2021, 289: 106168.
- [18] ZHAO L, LUO Y, LI Y, et al. Different disaster characteristics of earth fissures and their influence factors in the Beijing plain[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2020, 382: 629-634.
- [19] LONG D, YANG W T, SCANLON B R, et al. South - to - North Water Diversion stabilizing Beijing's groundwater levels[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3665.
- [20] XIAO Z A, XIONG W A, RONG Z A, et al. Identifying the facts and driving factors of deceleration of groundwater table decline in Beijing during 1999 - 2018 [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127475.
- [21] 龚高太,李佳豪,周吕,等. 时序 InSAR 北京地区地表沉降监测与分析[J]. 测绘通报,2022(9):123-128.
- [22] 雷坤超,马凤山,罗勇,等. 北京平原区现阶段主要沉降层位与土层变形特征[J]. 工程地质学报,2022,30(2):442-458.
- [23] 北京市水文地质工程地质公司. 北京市地面沉降调研报告[R]. 北京:北京市水文地质工程地质公司,1984.
- [24] 赵龙,北京市平原区高精度(1:5万)地面沉降和地裂缝调查[R]. 北京:北京市地质工程勘察院,2018.
- [25] 田芳,罗勇,周毅,等. 北京地面沉降与地下水开采时空演变对比[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):163-169.
- [26] 罗勇. 北京市地面沉降监测系统年运行费(2019年)[R]. 北京:北京市地质工程勘察院,2019.
- [27] 刘严萍,张飞涟,王勇,等. 北京近年地面沉降监测研究[J]. 测绘科学,2014,39(10):68-70.
- [28] 雷坤超,罗勇,陈蓓蓓,等. 北京平原区地面沉降水准监测网点位优化[J]. 中国地质,2016,43(4):1457-1467.
- [29] LUO Y, CHEN B B, LEI K C, et al. Optimum design of level monitoring points for land subsidence[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(7): 5135-5146.
- [30] 于海若,宫辉力,陈蓓蓓,等. 京津冀地区地面沉降研究进展与思考[J]. 测绘科学,2020,45(4):125-133,141.
- [31] LEI K C, MA F S, CHEN B B, et al. Three - dimensional surface deformation characteristics based on time series InSAR and GPS technologies in Beijing, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 3964.
- [32] ZHANG Y Q, GONG H L, CHEN B B, et al. Seasonal displacements in upper - middle alluvial fan of Chaobai River, Beijing, China, observed by the permanent scatterers technique[C]//2009 Joint Urban Remote Sensing Event. May 20-22, 2009, Shanghai. IEEE, 2009: 1-6.
- [33] NG A H M, GE L L, LI X J, et al. Monitoring ground deformation in Beijing, China with persistent scatterer SAR interferometry [J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(6): 375-392.
- [34] 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市地面沉降研究[J]. 自然科学进展,2009,19(11):1261-1266.
- [35] CHEN M, TOMÁS R, LI Z H, et al. Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 468.
- [36] ZHU L, GONG H, LI X, et al. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 243-255.
- [37] GUO L, GONG H L, ZHU F, et al. Analysis of the spatiotemporal variation in land subsidence on the Beijing plain, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1170.
- [38] GAO M, GONG H, CHEN B, et al. Regional land subsidence analysis in eastern Beijing plain by InSAR time series and wavelet transforms[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 365.
- [39] DU Z, GE L, NG A H M, et al. Analysis of the impact of the South - to - North water diversion project on water balance and land subsidence in Beijing, China between 2007 and 2020 [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126990.
- [40] DUAN L, GONG H, CHEN B, et al. An improved multi - sensor MTI time - series fusion method to monitor the subsidence of Beijing subway network during the past 15 years [J]. Remote Sensing, 2020, 12(13): 2125.
- [41] 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.
- [42] YANG Q, KE Y H, ZHANG D Y, et al. Multi - scale analysis of the relationship between land subsidence and buildings: a case study in an eastern Beijing urban area using the PS - InSAR technique[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 1006.
- [43] LYU M, KE Y, GUO L, et al. Change in regional land subsidence in Beijing after south - to - north water diversion project observed using satellite radar interferometry[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(1): 140-156.
- [44] YU H, GONG H, CHEN B, et al. Analysis of the influence of groundwater on land subsidence in Beijing based on the geographical weighted regression (GWR) model[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 139405.
- [45] LI H, ZHU L, GONG H, et al. Land subsidence modelling using a long short - term memory algorithm based on time - series datasets[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2020, 382: 505-510.
- [46] DUAN G, GONG H, CHEN B, et al. Spatiotemporal heterogeneity of land subsidence in Beijing[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1-15.
- [47] ZHOU C, GONG H, CHEN B, et al. Quantifying the contribution of multiple factors to land subsidence in the Beijing Plain, China with machine learning technology [J]. Geomorphology, 2019, 335: 48-61.
- [48] HU L, DAI K, XING C, et al. Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel - 1 InSAR observations[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 82: 101886.
- [49] CHEN B, GONG H, CHEN Y, et al. Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 735: 139111.
- [50] CHEN B, GONG H, LI X, et al. Spatial - temporal characteristics of land subsidence corresponding to dynamic groundwater funnel in Beijing Municipality, China[J]. Chinese Geographical Sci-

- ence, 2011, 21(6): 753–764.
- [51] GUO L, GONG H L, LI J W, et al. Understanding uneven land subsidence in Beijing, China, using a novel combination of geophysical prospecting and InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(16): e2020GL088676.
- [52] LIU Y Y, YAN X, XIA Y P, et al. Characterizing spatiotemporal patterns of land subsidence after the south-to-north water diversion project based on sentinel-1 InSAR observations in the eastern Beijing plain[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5810.
- [53] ZHANG X, CHEN B B, GONG H L, et al. Inversion of groundwater storage variations considering lag effect in Beijing plain, from RadarSat-2 with SBAS-InSAR technology[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 991.
- [54] TAO L, ZHANG H, WANG C, et al. Ground deformation retrieval using quasi-coherent targets DInSAR, with application to suburban area of Tianjin, China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(3): 867–873.
- [55] GAO M L, GONG H L, LI X J, et al. Land subsidence and ground fissures in Beijing capital international airport (BCIA): evidence from quasi-PS InSAR analysis[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1466.
- [56] 赵守生, 刘明坤, 周毅. 北京市地面沉降监测网建设[J]. *城市地质*, 2008, 3(3): 40–44.
- [57] ZHANG Y Q, GONG H L, GU Z Q, 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.
- [58] 刘贺, 崔文君, 罗勇, 等. 基于分层监测的北京天竺地面沉降、地下水位与孔隙水压力变化规律[J]. *地质通报*, 2022, 41(4): 692–701.
- [59] CHEN B, GONG H, LEI K, et al. Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 75: 54–67.
- [60] LEI K C, MA F S, CHEN B B, et al. Characteristics of land-subsidence evolution and soil deformation before and after the Water Diversion Project in Beijing, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2022, 30(4): 1111–1134.
- [61] OHNO H, NARUSE H, KIHARA M, et al. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, 7(1): 45–64.
- [62] HAUSWIRTH D, PUZZIN A M, CARRERA A, et al. Use of fibre-optic sensors for simple assessment of ground surface displacements during tunnelling[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(10): 837–842.
- [63] ZHANG C C, ZHU H H, LIU S P, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements[J]. *Engineering Geology*, 2018, 234: 83–96.
- [64] WU J, JIANG H, SU J, et al. Application of distributed fiber optic sensing technique in land subsidence monitoring[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2015, 5(5): 587–597.
- [65] GU K, SHI B, LIU C, et al. Investigation of land subsidence with the combination of distributed fiber optic sensing techniques and microstructure analysis of soils[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 34–47.
- [66] LIU S P, SHI B, GU K, et al. Land subsidence monitoring in sinking coastal areas using distributed fiber optic sensing: a case study[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(3): 3043–3061.
- [67] 李超, 肖景泽, 何静, 等. 北京通州某地浅部松散层压缩变形 BOTDR 监测分析[J]. *岩土工程技术*, 2020, 34(3): 130–134.
- [68] 崔亚莉, 邵景力, 谢振华, 等. 基于 MODFLOW 的地面沉降模型研究: 以北京市区为例[J]. *工程勘察*, 2003, 31(5): 19–22.
- [69] 杨艳, 王荣, 罗勇. 北京典型地面沉降区土体压缩特征研究[J]. *现代地质*, 2016, 30(3): 716–722.
- [70] 刘明坤, 寇文杰, 罗勇, 等. 北京市地面沉降与地下水开采关系分析[J]. *城市地质*, 2016, 11(1): 21–25.
- [71] 姜媛, 田芳, 罗勇, 等. 北京典型地区分层地面沉降与地下水位变化关系[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1): 95–99.
- [72] LEI K, CHEN B, JIA S, et al. Primary investigation of formation and genetic mechanism of land subsidence based on PS-InSAR technology in Beijing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(8): 2185–2189.
- [73] 曹文炳, 万力, 龚斌, 等. 水位变化条件下黏性土渗流特征试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(2): 118–122.
- [74] 肖树芳, 房后国, 王清. 软土中结合水与固结、蠕变行为[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(4): 531–535.
- [75] LEI K, MA F, CHEN B, et al. Effects of South-to-North Water Diversion Project on groundwater and land subsidence in Beijing, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(1): 1–24.
- [76] 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.
- [77] ZHU L, GONG H, CHEN Y, et al. Effects of Water Diversion Project on groundwater system and land subsidence in Beijing, China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 276: 105763.
- [78] 田苗壮, 赵龙, 崔文君, 等. 南水北调背景下地下水位上升对地面沉降控制与影响—以北京潮白河地下水系统为例[J]. *中国地质*, 2023, 50(3): 872–886.
- [79] 张双成, 张雅斐, 司锦钊, 等. 南水进京后升降轨 InSAR 解译北京地面沉降发展态势[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*: 1–15[2023-08-31]. DOI: 10.13203/j.whugis20210554.

## The Advance and Considerations on Land Subsidence in Beijing Plain

LI Yumei<sup>1,2</sup>, LUO Yong<sup>3</sup>, ZHAO Long<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 2. Development Research Center of China Earthquake Administration, Beijing 100036, China; 3. Beijing Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100195, China; 4. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** We analyse the research results of land subsidence in Beijing over many years, and discuss the history of the formation and development of land subsidence, monitoring techniques, influencing factors and the relationship between groundwater extraction and land subsidence, as well as the impact of the operation of the South to North Water Diversion Central Project (southern water to Beijing) on ground subsidence. In recent years, more attention has been paid to the application of new technologies and methods for subsidence monitoring, including the application of InSAR and distributed fibre-optic technology, which have greatly improved the coverage and real-time detection capability of subsidence monitoring. Based on the analysis of the application results, it is found that unscientific groundwater exploitation is the main cause of ground subsidence, and southern water to Beijing has a positive effect on controlling the rapid development of land subsidence. At present, there is a dual effect of land rebound and subsidence in the Beijing Plain, and the impact of the superposition of the two factors on regional geological safety is still an issue that needs continuous attention in the future.

**Keywords:** land subsidence; groundwater exploitation; monitoring technology; South to North water division; Beijing Plain