

doi: 10.12029/gc20220105002

田苗壮, 赵龙, 崔文君, 郭高轩, 刘贺, 孙爱华, 王新惠, 陈航, 吴盼. 2023. 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, 50(3): 872–886.

Tian Miao Zhuang, Zhao Long, Cui Wenjun, Guo Gaoxuan, Liu He, Sun Aihua, Wang Xinhui, Chen Hang, Wu Pan. 2023. Control and influence of rising groundwater level on land under the background of South-to-North Water Diversion: A case study of Chaobai River groundwater system in Beijing[J]. Geology in China, 50(3): 872–886(in Chinese with English abstract).

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

田苗壮¹, 赵龙^{1,2}, 崔文君¹, 郭高轩¹, 刘贺¹, 孙爱华¹, 王新惠¹, 陈航³, 吴盼⁴

(1. 北京市地质环境监测所, 北京 100195; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 3. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 4. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205)

摘要:【研究目的】从 20 世纪 80 年代开始, 北京市地下水过量开采, 引起了严重的地面沉降。2014 年南水进京后, 北京市开展了大规模的自备井置换、地下水禁限采、生态补水, 区域地下水位显著回升, 地面沉降发展缓减, 甚至在部分地区“回弹”。地下水位回升条件下与地面沉降响应是一个复杂的过程。开展相关研究对北京市的地面沉降防控意义重大, 也可为全国地面沉降防控提供借鉴。【研究方法】本文以潮白河流域平原区为例, 综合利用合成孔径雷达干涉测量技术、分层标和地下水分层监测技术, 对区域地面沉降与地下水进行立体监测, 探明了“地面沉降”对地下水位上升过程的响应特征。【研究结果】(1) 潮白河地下水回补后第一、第二承压含水层单井最大水位回升分别为 25.49 m 和 25.67 m; (2) 2015—2020 年区域最大回弹速率、回弹范围与地下水上升区等水位线基本吻合; (3) 潮白河冲积扇中上游地区不同岩性土层在地下水回弹模式下, 土体压缩持续减缓或回弹, 下游地区未受到地下水补给, 水位持续下降, 土体形变持续压缩。【结论】潮白河生态补水使地下水位上升, 有效控制了地面沉降快速发展趋势。

关键词: 地面沉降; 地面回弹; 潮白河; 地下水系统; 地下水位上升; 水文地质调查工程; 北京市

创 新 点: (1) 以南水进京为背景研究了地下水位上升对地面沉降引发的新影响; (2) 利用合成孔径雷达干涉测量技术、分层标监测技术和地下水分层监测技术相结合进行精细化监测; (3) 点面相结合对地面沉降与地下水响应关系进行了横向和垂向对比研究。

中图分类号: P642.26; P641.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)03-0872-15

Control and influence of rising groundwater level on land under the background of South-to-North Water Diversion: A case study of Chaobai River groundwater system in Beijing

TIAN Miao Zhuang¹, ZHAO Long^{1,2}, CUI Wenjun¹, GUO Gaoxuan¹, LIU He¹,
SUN Aihua¹, WANG Xinhui¹, CHEN Hang³, WU Pan⁴

收稿日期: 2022-01-05; 改回日期: 2022-04-07

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8212042)、北京市地面沉降监测运行项目(PXM2021_158305_000006)、国家重点研发计划课题(2017YFB0503803)、北京市科技计划课题(Z191100001419007)及北京市财政项目(11000022T000000440128)联合资助。

作者简介: 田苗壮, 男, 1991 年生, 工程师, 主要从事地面沉降监测、调查与防治研究工作; E-mail: tianmiao Zhuang@126.com。

(1. *Beijing Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100195, China*; 2. *School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China*; 4. *Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China*)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] Overexploitation of groundwater in Beijing has caused serious land subsidence since the 1980s. After the south water entered Beijing in 2014, closure of self-contained water-source well and water-source replacement, groundwater mining restriction, and ecological water supplement carried out on a large scale in Beijing led to a significant rise in groundwater table. Ground subsidence slowed down, and even rebounded in some areas. Response of ground subsidence to groundwater table rise is a complicated process. The relevant research is of great significance to the prevention and control of land subsidence in Beijing, further providing reference for the prevention and control of land subsidence in China. **[Methods]** The plain area of Chaobai River Basin was selected in this study, and the spatial monitoring of regional land subsidence and groundwater was carried out by using synthetic aperture radar interferometry, land subsidence layered mark monitoring technology and groundwater layered monitoring technology to verify the response characteristics of land subsidence to the rising groundwater table. **[Results]** (1) With the recharge of Chaobai River groundwater, the maximum water table of the first and second confined aquifers returned 25.49 m and 25.67 m, respectively. (2) The maximum rebound rate and rebound range of the region from 2015 to 2020 were basically consistent with the water table contour in the groundwater rising area. (3) In the middle and upper reaches of alluvial fan of Chaobai River, the soil compression of different lithologic soil layers continued slowing down or rebounding under the groundwater table restoration mode. But the groundwater table continued declining in the downstream area where groundwater was not recharged, and the soil deformation continued compressing. **[Conclusions]** The ecological water supplement of Chaobai River led to the increase in groundwater table, which effectively controlled the rapid trend of land subsidence development.

Key words: land subsidence; ground rebound; Chaobai River; groundwater system; rise of groundwater table; hydrogeological survey engineering; Beijing

Highlights: (1) The latest influence of rising groundwater table on land subsidence was studied based on the background of South Water Diversion into Beijing; (2) Accurate monitoring was carried out by using the combination of synthetic aperture radar interferometry technology, layered mark monitoring technology and groundwater layered monitoring technology; (3) The horizontal and vertical comparative study of the relationship between ground subsidence and groundwater response was carried out both in spots and entire area scale.

About the first author: TIAN Miaozihuang, male, born in 1991, engineer, mainly engaged in land subsidence monitoring, investigation and prevention research; E-mail: tianmiaozihuang@126.com.

Fund support: Supported by the Beijing Natural Science Foundation (No.8212042), Monitoring of Land Subsidence in Beijing (No. PXM2021_158305_000006), National Key Research and Development program Project (No.2017YFB0503803), Municipal Science and Technology Project (No. Z191100001419007), Beijing Financial Project (No.11000022T000000440128).

1 引言

地面沉降是制约和影响北京市城市发展和安全运行的一种缓变的地质灾害,其危害大、不可逆、损失大;自2000年以来的监测工作,已经取得了一些成果,对规划重大交通和线性工程起到很好的支撑作用,但是仅限于从多手段进行监测,而对遏制和防治手段比较欠缺。自2014年南水进京以来,北京市开展了大规模的自备井置换、地下水禁限采、生态补水等措施,压采和减采使地下水开采有所减缓,但是这

些都是被动和间接手段,自2015年以来开展潮白河和永定河冲积扇上游地下水回补工作,则为北京主动防治工作的开展提供了契机。

目前,国内外学者针对南水进京后地下水回补及地面沉降时空演化规律等方面开展了大量的研究工作。以往研究表明:超采地下水是地面沉降快速发展主要诱因(贾三满等,2007;田芳等,2012;Chen et al.,2019)。随着南水进京,北京市先后采取多种控沉措施,地下水回升明显,沉降中心速率明显减缓(程凌鹏等,2018;秦欢欢,2019;雷坤超等,

2020;晏霞等,2021;郭海朋等,2021)。自2017年以来,北京平原区不同含水层组地下水位总体表现出不同程度的回升(罗勇等,2019;王云龙等,2023)。由于地下水回补过程中,不同岩性土层在不同深度水位变化模式下表现出变形特征差异,精准识别地面沉降主要贡献层位,是有针对性地开展精准防控的前提与基础(李红等,2016;周毅等,2016a)。在地下水由降转升的过程中不同岩性不同层位土体形变也将表现出不同的变形特征(Burbey,2001;雷坤超等,2016;Ye et al.,2016;田芳等,2017),因此查明南水进京后地下水回补对区域空间沉降变化,土层应力-应变特征,对北京市的地面沉降防控意义重大,也可为全国地面沉降防控提供借鉴。

本文以潮白河地下水系统回补为研究对象,分析不同含水层组同期水位动态变化,利用永久散射

体干涉测量技术(Permanent Scatterer for SAR Interferometry,PS-InSAR)获取的2014—2020年地表形变信息,揭示区域弹性空间沉降变化特征,同时结合平各庄、天竺和张家湾地面沉降站分层监测,探究地下水回补对沉降不同层位的影响。

2 区域概况

潮白河冲积扇位于北京平原区东部,属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温 12.8°C ,年均降雨量 610 mm 左右,降水蒸发量为 1700 mm 左右,降水主要集中在6—9月。依据水文地质条件和地层结构,研究区可划分为上游、中游和下游(图1),地层颗粒由粗变细,含水层结构由构成单一,透水性好过渡到细砂、粉砂与黏土、亚黏土互层的多层含水层结构(郭高轩等,2014;程蕊等,2021;图2)。第四系厚

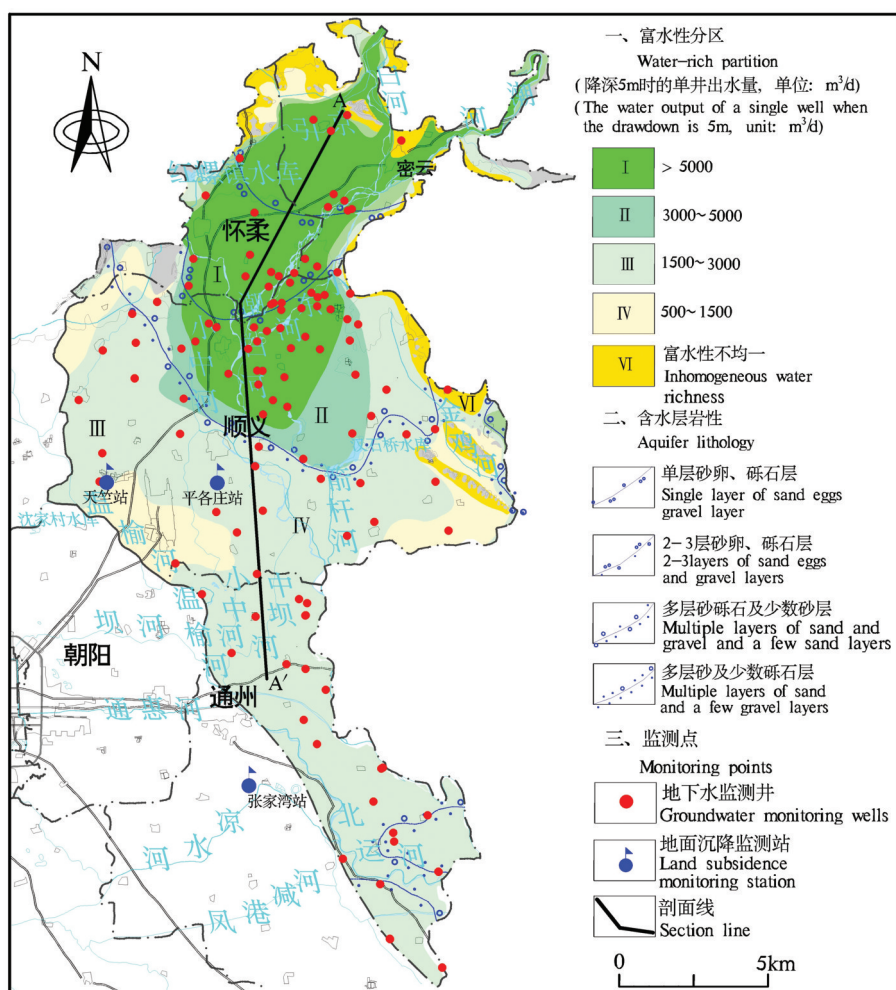


图1 研究区概况图

Fig.1 Sketch map of the study area

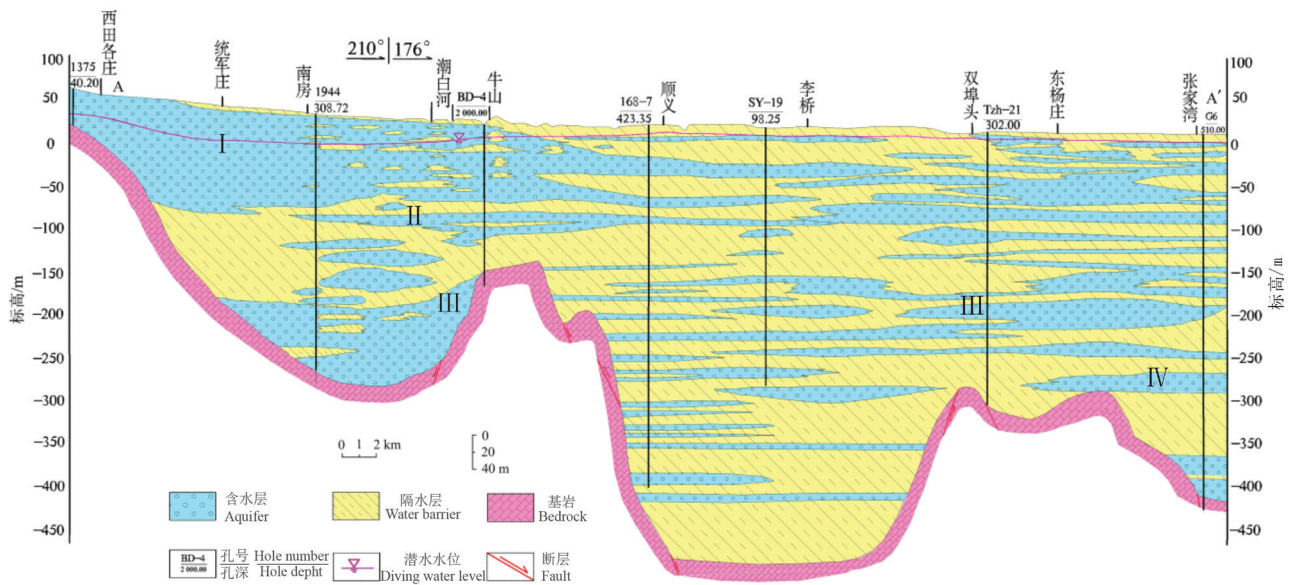


图2 潮白河冲积扇水文地质剖面图(剖面AA')(据郭高轩等,2014)

Fig.2 Hydrogeological section of Chaobai River alluvial-proluvial fan (see section AA') (after Guo Gaoxuan et al., 2014)

度逐渐增大,下游张家湾地区厚度可达600余米。

根据地层年代、岩性、埋藏条件及地下水补径排条件,以及地下水的开发利用等因素,研究区第四系中的含水层和弱透水层组合在一起,对含水层进行概化,在垂向上将监控层位划分成4个主要含水层组。第一含水层组:主要为浅水及埋深小于50 m的浅层具有微承压性质的含水层组。第二含水层组:广泛分布于区内承压水区,含水层组底界深度80~120 m,局部地区以基岩作为底界。第三含水层组:分布于冲洪积扇中下部地区,含水层组底板埋深150~180 m,局部地区以基岩作为底界。第四含水层组:底界埋深在300 m,局部地区为第四系基底(刘予等,2007;蔡向民等,2009;周毅等,2016b)。

潮白河地下水回补工作于2015年开展,每年4—6月进行地下水回补,截至2020年底,地下水回补共计50150.89万 m^3 (图3)。南水北调水经京密引水渠李史山分水闸放水后,通过小中河、牯牛河、怀河,最后进入潮白河牛栏山橡胶坝上游回补水源地下水;另一部分是上游水库汛期放水进入河道,补给地下水。

3 监测方法和数据

3.1 地下水动态监测

区域地下水动态监测是掌握含水层释水形变特

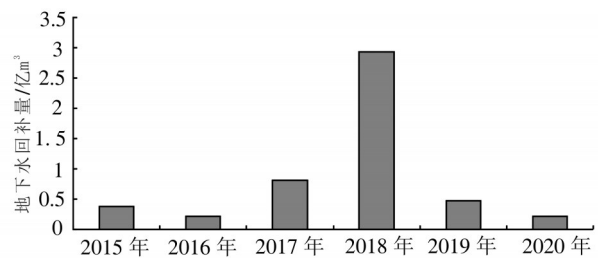


图3 2015—2020年地下水回补量(据赵泓漪等,2014—2020)
Fig.3 Groundwater recharge volume during 2015–2020 (after Zhao Hongyi et al., 2014–2020)

征的重要手段,本次工作利用研究区分层地下水动态监测网,作为不同含水层系统长序列动态监测井,并参考了研究区内平各庄监测站分层动态监测水位信息。研究区内地下水动态监测井共计163眼,用于掌握区域地下水流动态变化规律。人工监测井每月监测5次,自动监测井每日监测1次(图1)。

3.2 PS-InSAR 监测

针对研究区地表回弹现象及区域面积较大,地层结构复杂等特点,本次采用 RadarSAT-2 卫星获取的雷达数据作为 SAR 数据源。获取2014—2020年间共计50景 RadarSAT-2 卫星雷达数据,地面标称分辨率为30 m \times 30 m,完整覆盖整个研究区范围,利用相干目标差分干涉相位时间序列进行地表形

变信息解算,根据差分干涉相位的时空频谱特性来解算地面沉降速率。选取建筑物、道路桥梁以及裸露的岩石等典型相干目标,在这些目标的差分相位上得到由地面沉降所引起的变化,通过分析相干目标差分干涉相位的变化反演地面沉降状况(周超凡等,2017;周朝栋等,2017;刘宏伟等,2018;)。

3.3 监测站分层标监测

分层标监测是目前垂向变形监测的重要手段之一,是掌握不同埋深水文地质单元形变力学特征的重要监测途径(姜媛等,2015;杨艳等,2016)。研究区内地面沉降监测站3座(图1),其中平各庄监测站、天竺监测站位于研究区中部,张家湾位于研究区下部。地面沉降监测站分别监测不同深度地层的沉降信息、孔隙水压力和含水层水位动态变化信息。

平各庄地面沉降监测站内布设基岩标1座,分层标7座。站内120 m以浅地层岩性以砂层与黏土层互层,各占比50%。天竺地面沉降监测站内布设基岩标1座,分层标10座,站内102 m以浅地层岩性砂层占31.3%与黏土层比占68.7%。张家湾监测站内布设基岩标1座,分层标7座,站内126 m以浅地层岩性砂层占59%与黏土层比占41%。因此,本次主要利用126 m以浅站分层标所对应的地下水动态监测孔进行分析研究,进一步阐明地下水回补对地面沉降垂向变化规律进行分析(表1)。

4 地下水和地面沉降动态变化

4.1 地下水位动态变化

研究区中上游地区主要分为4个赋水含水层,根据长序列分层地下水动态监测结果(图4),2014年随着地下水回补,第一含水层和第二含水层水位上升趋势明显,单井最大水位回升25.49 m和25.67

m,第三、四含水层主要用于生活开采,水位稳定在23 m和26 m上下波动。

含水层组同期水位对比结果见图5,2020年相比于2015年第一和第二含水层在杨宋—牛栏山应急水源地一带水位涨幅在25 m左右,上升区域面积分别为1301 km²、917 km²,影响范围由水源八厂地区向四周扩散,第一含水层最大影响半径达12.8 km,第二含水层最大影响半径达21.9 km。研究区中上游地层结构单一的砂卵砾石条件下,地下水回补对研究区中上游第一、二含水层水位回升具有明显效果,第一含水层(图5a)及第二含水层(图5b)区域水位整体涨幅均大于2 m,回补至下游地区地下水回升逐渐减弱。

4.2 InSAR 监测结果

文中选取2014—2020年50景RadarSAT-2雷达卫星SAR影像获取的潮白河区域地面沉降速率分布图结果发现:2014年南水回补后研究区中上游地区地下水回补影响地面沉降空间分布减缓较明显变化,上游地区地面发生回弹。区域沉降回弹范围沿潮白河两侧向东北、东南、西北、西南方向逐渐扩大,回弹区域范围从2015年的牛栏山地区扩大至赵全营—张镇—南彩—杨镇—北小营地区,回弹面积4 km²扩大到266.8 km²(图6)。2015—2020年地下水回补后最大回弹速率分别为2.83 mm/a、2.70 mm/a、5.1 mm/a、6.4 mm/a、10.4 mm/a、5.04 mm/a。将PS-InSAR获取的研究区2015—2020年时间序列地面回弹速率分布图与不同含水层组同期水位线叠加进行分析发现,地面回弹范围与地下水位回升等水位线空间展布大致相同,2014、2015和2020年地面沉降回弹范围与第一含水层上升水位线基本吻合,2017—2019年地下水回补量的逐渐增多,第一含

表1 平各庄站、天竺站、张家湾站126 m以浅层地下水、分层标分层情况

Table 1 Summary of groundwater table and extensor meters within 126 m in Pinggezhuang, Tianzhu, and Zhangjiawan stations

	指标	观测层位/m	区域含水层	指标	观测层位/m	区域含水层	指标	观测层位/m	区域含水层
平各庄站	D5-5	15.00~30.00		D5-4	39.00~64.00		D5-3	81.00~119.00	
天竺站	F5-7	2.00~31.90		F5-6	31.90~63.10		F5-5	63.10~119.64	
张家湾站	D3-6	27.50~31.00	第一含水层组	D3-5	59.30~63.40	第一含水层组	D3-4	85.90~91.30	第二含水层组
	F3-10	3.40~35.43		F3-7	65.50~82.30		F3-6	82.30~102.00	
	D6-5	19.00~28.00		D6-4	34.00~48.00		D6-3	89.00~127.00	
	F6-7	3.00~30.00		F6-6	30.00~49.00		F6-4	90.00~126.00	

注:D代表地下监测层,F代表分层标监测层。

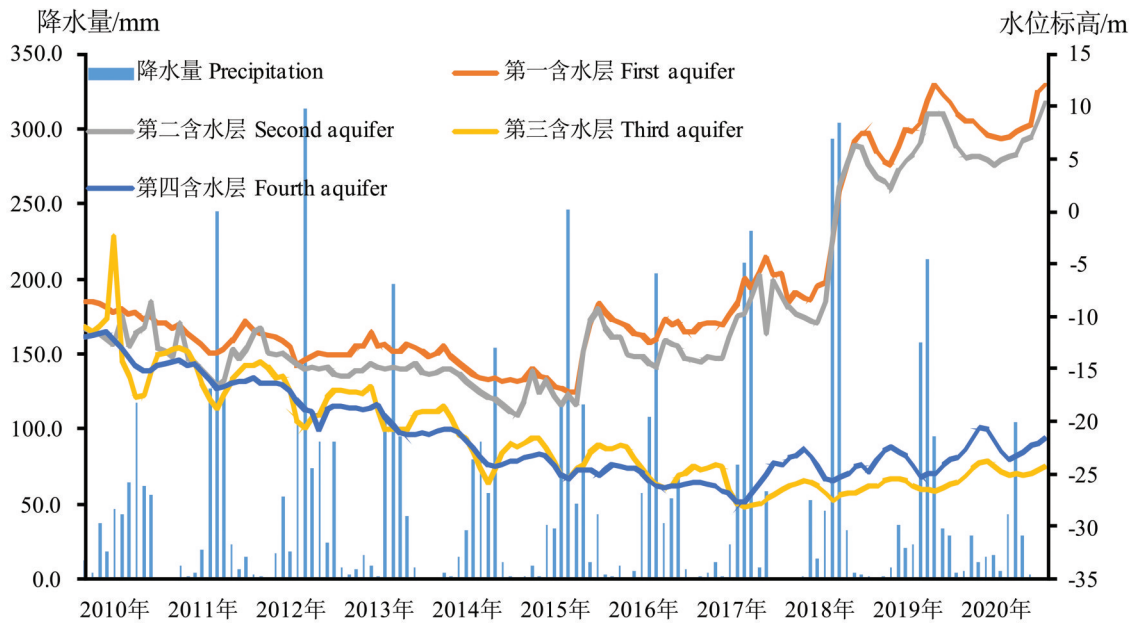


图4 2010—2020年降雨变化趋势及不同承压含水层水位变化曲线

Fig.4 Changes in precipitation and groundwater table in different confined aquifers during 2010–2020

水层储水能力的增加,地下水开始侧向越流,受到上部越流补给,在得到第一含水层补给的同时开始水平向研究区中下部径流。地面沉降减缓范围与一、二含水层组同期上升水位线基本吻合。

4.3 分层沉降动态变化

地面沉降监测站能够实时获取各个主要沉降区地面沉降分层监测数据,掌握潮白河区域地下水回补对地面沉降发展变化情况。

4.3.1 平各庄站沉降动态变化

平各庄监测站位于永定河冲积扇中部,地下水回补今120 m以浅3个层位沉降速率均发生不同程度减缓趋势(图7)。F5-6(埋深31.90~63.10 m)层位2017—2020年连续出现回弹,回弹占比从4.30%增长至2020年的15.50%;F5-5(埋深63.10~119.64 m)层位2014—2019年沉降速率逐年减小,2020年沉降略有回升;F5-7(埋深2.00~31.90 m)层位回补初期沉降速率逐年下降并出现回弹现象,2019—2020年沉降占比持续上升。

4.3.2 天竺站沉降动态变化

天竺监测站位于永定河冲积扇中部边缘,2014年至今地下水回补后102 m以浅3个层位沉降速率均发生不同程度减缓趋势(图8),3个层位年沉降速率均逐年下降,F3-6(埋深82.30~102.00 m)和F3-10(埋深2.40~35.43 m)部分年份发生回弹现象。

4.3.3 张家湾站沉降动态变化

张家湾监测站位于永定河冲积扇下部,2014年至今地下水回补后126 m 3个层位中F6-4(埋深90.00~126.00 m)监测层位2014—2018年均出现回弹现象;F6-6(埋深30.00~49.00 m)监测层位2017年沉降速率出现回弹外,其余年份沉降速率逐年减小,沉降量均小于2 mm;F6-7(埋深2.00~30.00 m)监测层位整体呈减小趋势(图9)。

5 地下水位变化对地面沉降影响分析

通过对不同含水层地下水位和土体变形进行监测,分析地下水位变化与土层变形之间的响应关系,揭示地下水位动态变化条件下不同土体形变特征。将平各庄、天竺、张家湾3个地面沉降监测站120 m以浅监测层分为浅部、中部和深部沉降层进行地下水变化与土层形变进行对比分析,查明地下水回补对地面沉降变化。

5.1 浅部土体沉降影响分析

浅部土层岩性占比中,平各庄站分层标F5-7(埋深2.00~31.90 m)层位砂层与黏土层占该监测层段总厚度的59%与41%。天竺站分层标F3-10(埋深2.40~35.43 m)砂层与黏土层占该监测层段总厚度的84%与16%。张家湾站分层标F6-7(埋深2.00~30.00 m)砂层与黏土层占该监测层段总厚度

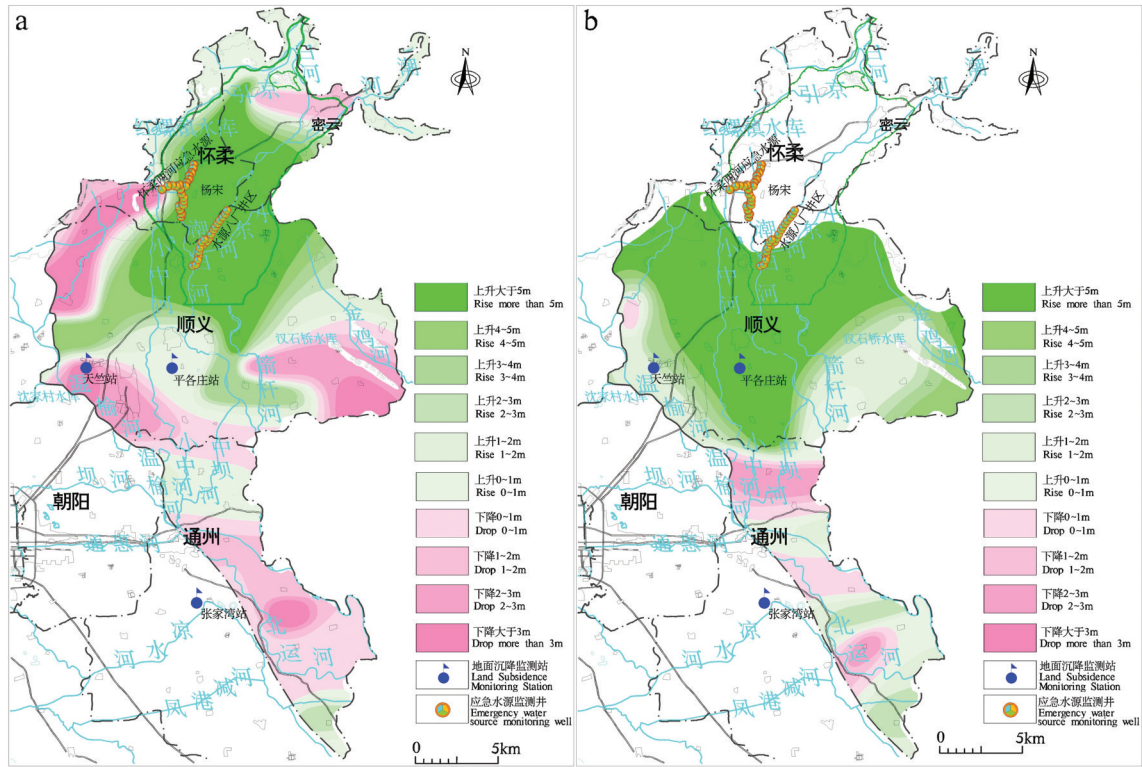


图5 2020年与2015年同期水位变幅图(a,第一含水层;b,第二含水层)

Fig.5 Amplitude variation in groundwater table for the same periods in 2020 and 2015 (a, First confined aquifer; b, Second confined aquifer)

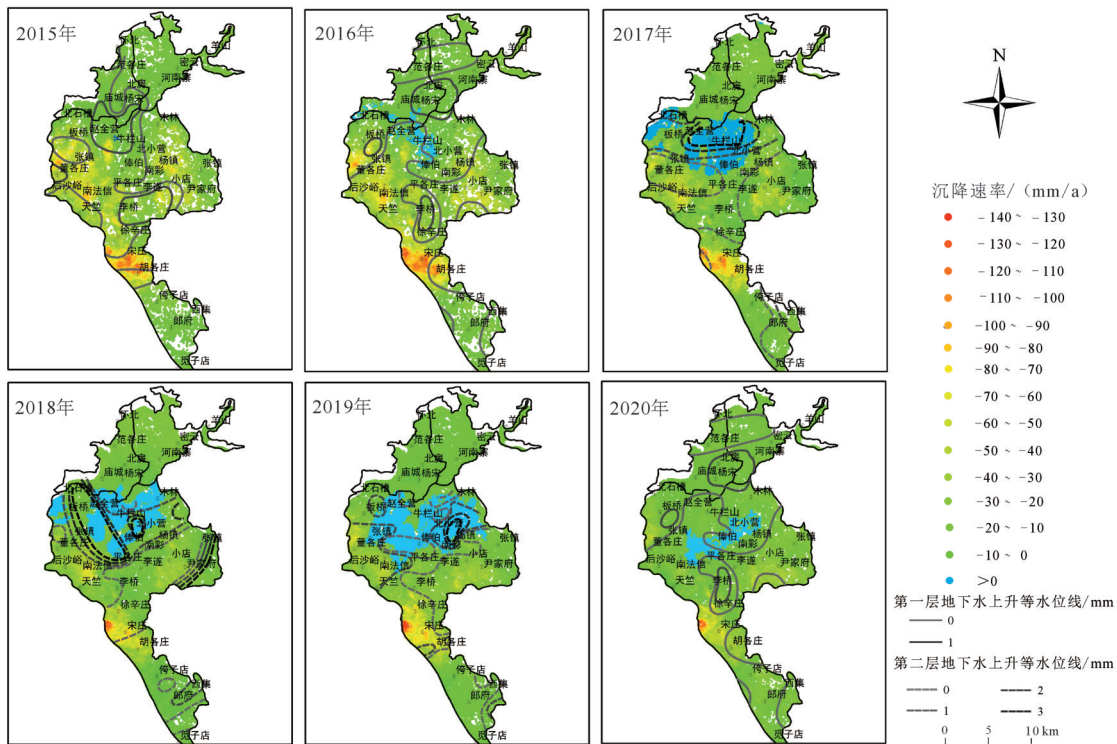


图6 2015—2020年研究区PS-InSAR 沉降速率分布图

Fig.6 Distribution of PS-InSAR sedimentation rate in study area during 2015-2020

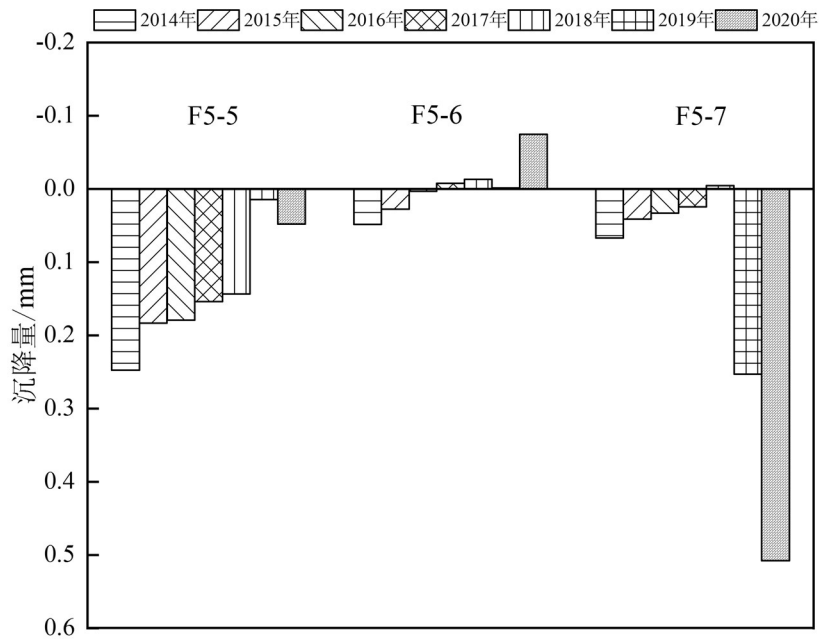


图7 2014—2020年平各庄站120 m以浅地层监测成果

Fig.7 Stratigraphic monitoring result within 120 m in Pinggezhuang station during 2014–2020

的54.8%与45.2%。平各庄站与张家湾站岩性土层相近,均以砂层为主,天竺站以粉土层为主。

土体形变与水位变化趋势表现为,平各庄站地下水回补后,水位逐渐回升,并稳定在20 m上下波动,土体变形量整体表现出沉降持续减缓,部分年

份发生回弹现象(图10a)。天竺站回补初期整体较稳定,2017年以后水位快速回升,升幅近6 m,土体变形量整体表现出持续减缓,部分年份发生回弹现象,2019年回弹量达3.05 mm(图10c)。张家湾站地下水水位总体呈下降趋势,土体变形量整体表现与地

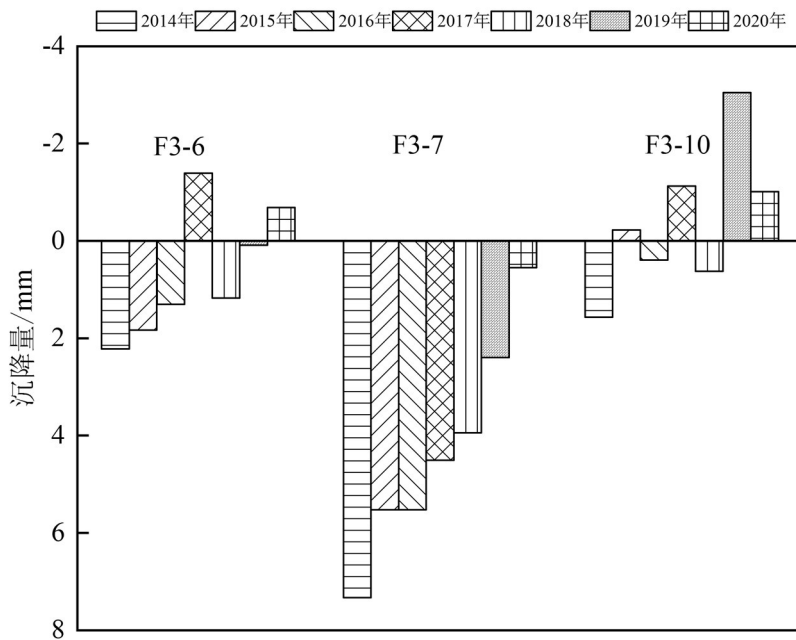


图8 2014—2020年天竺站102 m以浅地层监测成果

Fig.8 Stratigraphic monitoring result within 102 m in Tianzhu station during 2014–2020

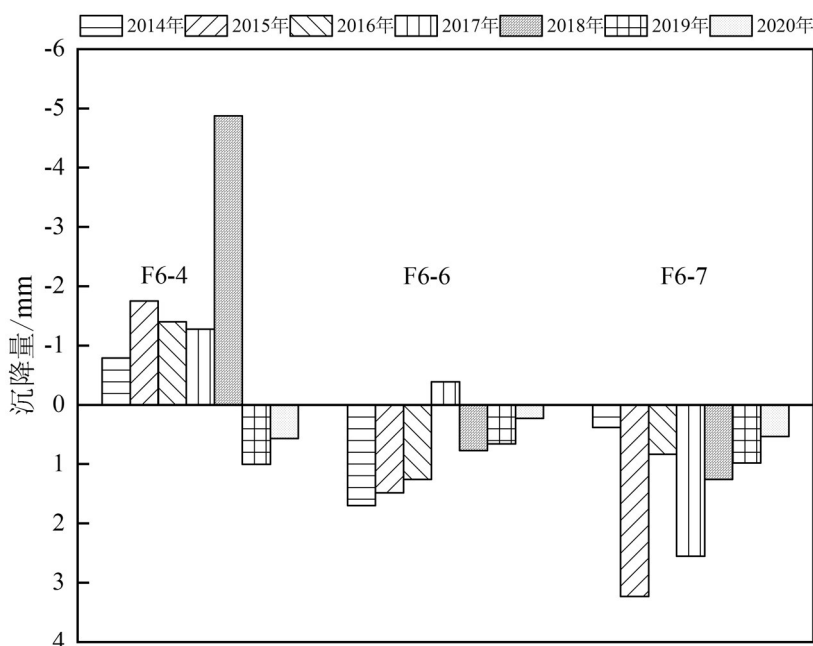


图9 张家湾站2014—2020年126 m以浅地层监测成果

Fig.9 Stratigraphic monitoring result within 126 m in Zhangjiawan station during 2014–2020

下水位趋势基本一致,地下水位下降时,土体持续压缩,水位上升时,土体沉降减缓(图10e)。

变形量和水位关系表现为,平各庄站地下水回补初期,水位回升时,土体仍持续压缩。地下水回补后期土体变形与水位变化趋势基本一致,水位下降期沉降持续压缩,水位上升期地层表现出一定的回弹特性,整体表现出土体由塑性变形特征转变为弹塑性变形特征(图10b)。天竺站回补初期水位变幅不大的情况下,形变量持续压缩,土体表现出塑性变形,后期水位快速回升,形变量曲线出现回滞环,说明水位上升期土体由塑性变形特征转变为弹塑性变形特征(图10d)。张家湾站回补初期土体沉降趋势表现出持续压缩,部分时间段内出现水位回升时土层小幅回弹,整体表现出弹塑性变形特征(图10f)。

平各庄站与天竺站,岩性土层不同的情况下,在地下水回补影响范围内土体形变与水位变化、变形量和水位关系特征相似,张家湾站与平各庄站浅部岩性土层基本相同的情况下,未在地下水回补影响范围内,土体形变与水位变化表现出不同形态特征。

5.2 中部土体沉降影响分析

中部土层岩性占比中,平各庄站分层标F5-6(埋深31.90~63.10 m)层位中砂层与黏土层占该监测层段总厚度的53.6%与47.4%。天竺站分层标

F3-7(埋深64.50~82.30 m)砂层与黏土层占该监测层段总厚度的6%与94%。张家湾站分层标F6-6(埋深30.00~49.00 m)砂层与黏土层占该监测层段总厚度的69%与31%。平各庄站与张家湾站以砂层为主,天竺站以黏土层为主。

土体形变与水位变化趋势表现为,平各庄站地下水回补后水位呈逐年回升趋势,土体变形量整体表现地下水前期持续压缩,2017年以后土体压缩量明显减缓并发生回弹现象,层位最大回弹量达0.6 mm(图11a)。天竺站回补初期水位呈快速下降趋势,2017年以后水位快速回升,水位标高由-6 m升至0.78 m。土体形变量表现由前期快速压缩转变为压缩趋势减缓(图11c)。张家湾站地下水位随季节性变化缓慢下降趋势,土体表现出几乎同步的压缩与回弹(图11e)。

变形量和水位关系表现为,平各庄站地下水回补初期地下水位持续上升,土体仍在持续压缩,2017年以后变形量曲线形成回滞环,土层持续减缓并出现回弹,表现出塑性变形特征转变为弹塑性变形特征(图11b)。天竺站回补初期水位持续下降,土体持续压缩,2017年以后水位回升,形变量曲线压缩减缓,部分周期内出现回滞环,表现出塑性变形特征转变为弹塑性变形特征(图11d)。张家湾站

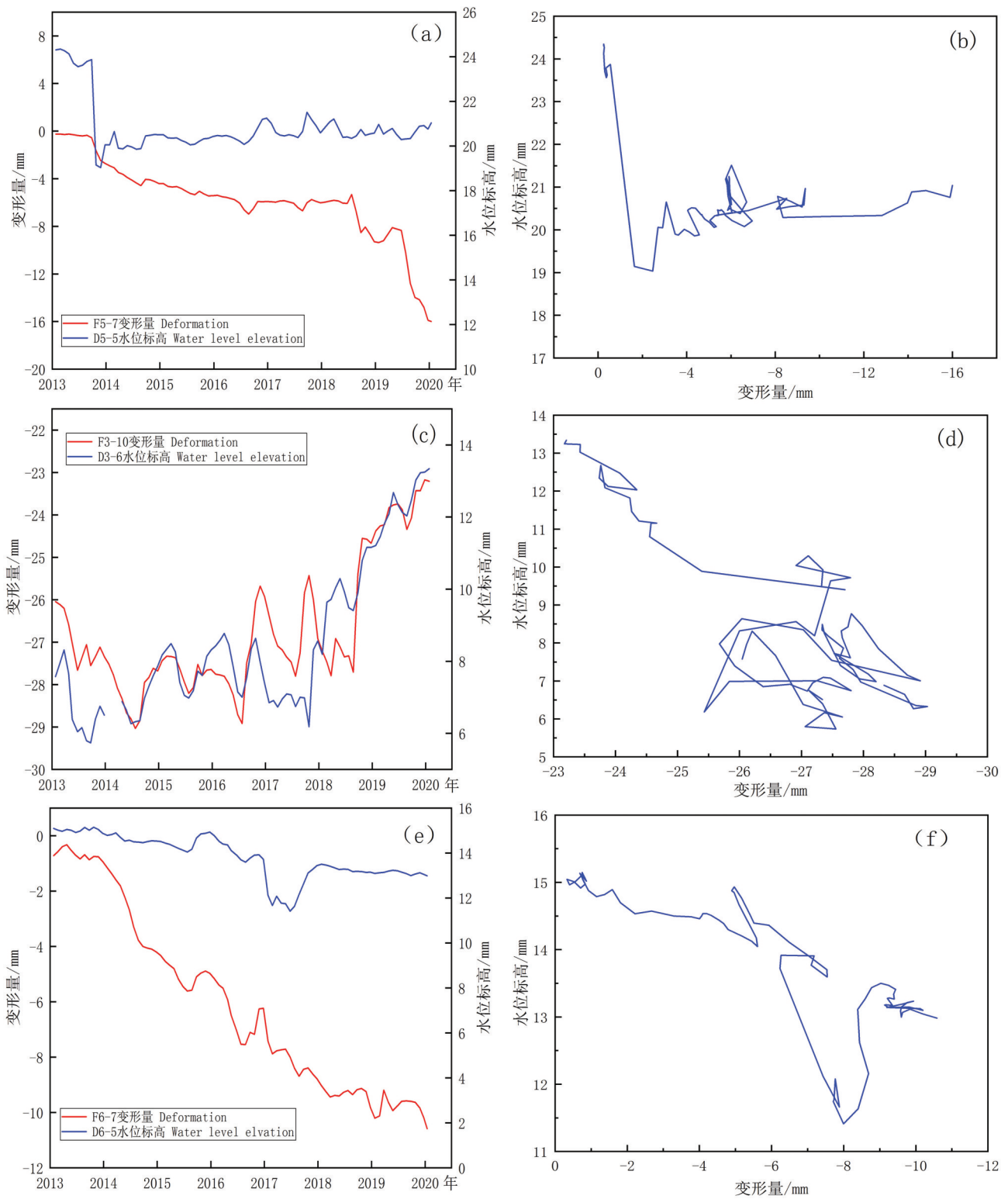


图10 2014—2020年浅部不同分层标土体形变与水位变化趋势线(a、c、e),以及不同分层标土体形变与水位关系(b、d、f)
Fig.10 Variation trends of soil deformation and groundwater level at different shallow extensormeter during 2014–2020 (a, c, e), and the relationship between them (b, d, f)

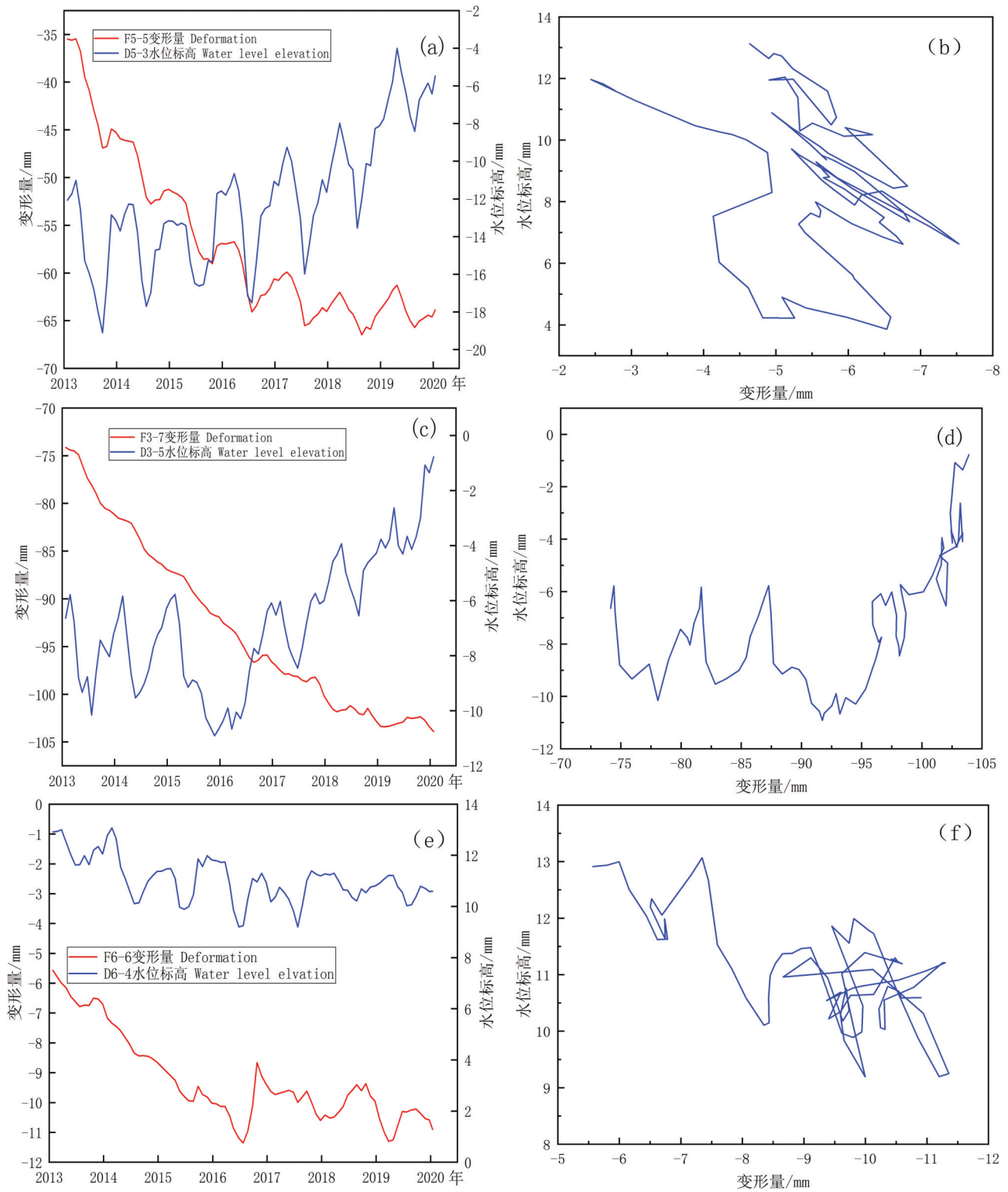


图 11 2014—2020 年中部分层标土体形变与水位变化趋势线(a, c, e), 以及不同分层标土体形变与水位关系(b, d, f)
 Fig.11 Variation trends of soil deformation and groundwater level at different middle extensormeter during 2014–2020 (a, c, e), and the relationship between them (b, d, f)

土体形变与地下水位波动同步压缩与回弹,表现出弹性变形特征,但塑性变形持续时间大于弹塑性变形(图11f)。

平各庄站与天竺站岩性土层不同情况下,地下水回补初期土体形变与水位变化、变形量和水位关系特征表现出不同特征,回补后期2个监测站特征基本相似,但天竺站地下水回补影响效果缓于平各庄站,而张家湾站与平各庄站均以砂层为主条件下,张家湾站未在地下水回补影响范围内表现出与平各庄站不同形态特征。

5.3 深部土体沉降影响分析

深部土层岩性占比中,平各庄站分层标F5-5(埋深63.10~119.64 m)砂层与黏土层占该监测层段总厚度的55.7%与44.3%。天竺站分层标F3-6(埋深82.30~102.00 m)砂层与黏土层占该监测层段总厚度的53%与47%。张家湾站分层标F6-4(埋深90.00~126.00 m)砂层与黏土层占该监测层段总厚度的88.6%与11.4%。平各庄站与天竺站砂层与黏土层占比基本接近,张家湾站砂层占比在该监测层中较大。

土体形变与水位变化趋势表现为,平各庄站地下水回补后水位呈季节周期性波动上升趋势,土体形变表现为持续压缩特征,但沉降趋势呈减缓趋势发展,压缩速率由10 mm/a降至1 mm/a(图12a)。天竺站回补初期水位缓慢下降,2017年以后水位逐年回升,土体形变量表现与平各庄站基本相似(图10c)。张家湾站水位呈年度周期内反复升降,土体表现出初期回弹,后期与水位同步压缩与回弹(图10e)。

变形量和水位关系表现为,平各庄站地下水位随时间周期性变化,水位升幅大于降幅,土体压缩速率持续减缓,但其残余压缩量大于水位回升的回弹量,土体表现出以塑性为主的弹塑性变形(图12b)。天竺站回补初期变形量曲线始终向右发展,土体持续压缩,2017年以后出现回滞环,地面沉降滞后性开始显现,土体表现出弹塑性变形特征(图12d)。张家湾站初期土体回弹,2017年以后土体随着水位升降持续压缩与回弹,但塑性变形持续时间大于弹塑性变形,土体表现出以塑性为主的弹塑性变形(图12f)。

平各庄站与天竺站岩性土层基本接近的情况下,土体形变与水位变化、变形量和水位关系特征表现出相同的特征,而张家湾站与上述两站土层差

异较大情况下表现出截然相反的特征。

5.4 综合分析

以上是潮白河冲积扇地下水回补后120 m以浅层不同岩性土层在地下水回升模式下的形变曲线。可以发现,平各庄站与张家湾站浅部、中部土体层位以砂层占比较多,天竺站以黏土层占比较多,深部地层中三者均以砂层占比较多。平各庄站和天竺站岩性土层不同的情况下由于在地下水回补影响范围内,二者地下水位逐步回升,土体压缩随之减缓并回弹,而张家湾站未受到地下水补给,水位持续下降,土体形变持续压缩。因此,在不同岩性土层情况下,开展潮白河冲积扇上游地下水回补工作,是有效遏制地面沉降快速发展因素。

6 讨论

开展潮白河冲积扇上游地下水回补是有效地制约地面沉降快速发展措施,在冲积扇中上游含水层结构单一条件,地下水回补过程中,地下水位上升与地面回弹范围只限于冲积扇上游地区,土体也表现出弹性变形特征。随着地层结构逐渐过渡到多层含水层结构,区域地面沉降依然持续,土体压缩过程中滞后时间也随之增加。受限于区域地质结构因素,冲积扇下游地区开展的地下水禁限采措施与上游地下水回补对地面沉降贡献占比还需要进一步研究。

因此,在开展地面沉降防控提供过程中,后续研究还需进一步完善各类钻孔资料并开展相关固结压缩实验,量化对黏土层与砂层沉降贡献率并建立地下水-地面沉降数值模型等。针对不同区域开展针对性的防治工作,是控制地面沉降快速发展最有效方式。特别是重点防控区域,开展地下水禁采、限采,开展地下水分层管控措施,并实施单井回灌实验研究。

7 结论

(1)南水进京后潮白河地下水回补对第一、第二承压含水层影响显著,水位回升明显,截至2020年最大水位回升分别为25.49 m和25.67 m,上升区域范围分别为1301 km²、917 km²,最大影响半径达12.8 km和21.9 km。

(2)2015—2020年地表回弹速率分别为2.83 mm/a、2.70 mm/a、5.1 mm/a、6.4 mm/a、10.4 mm/a、

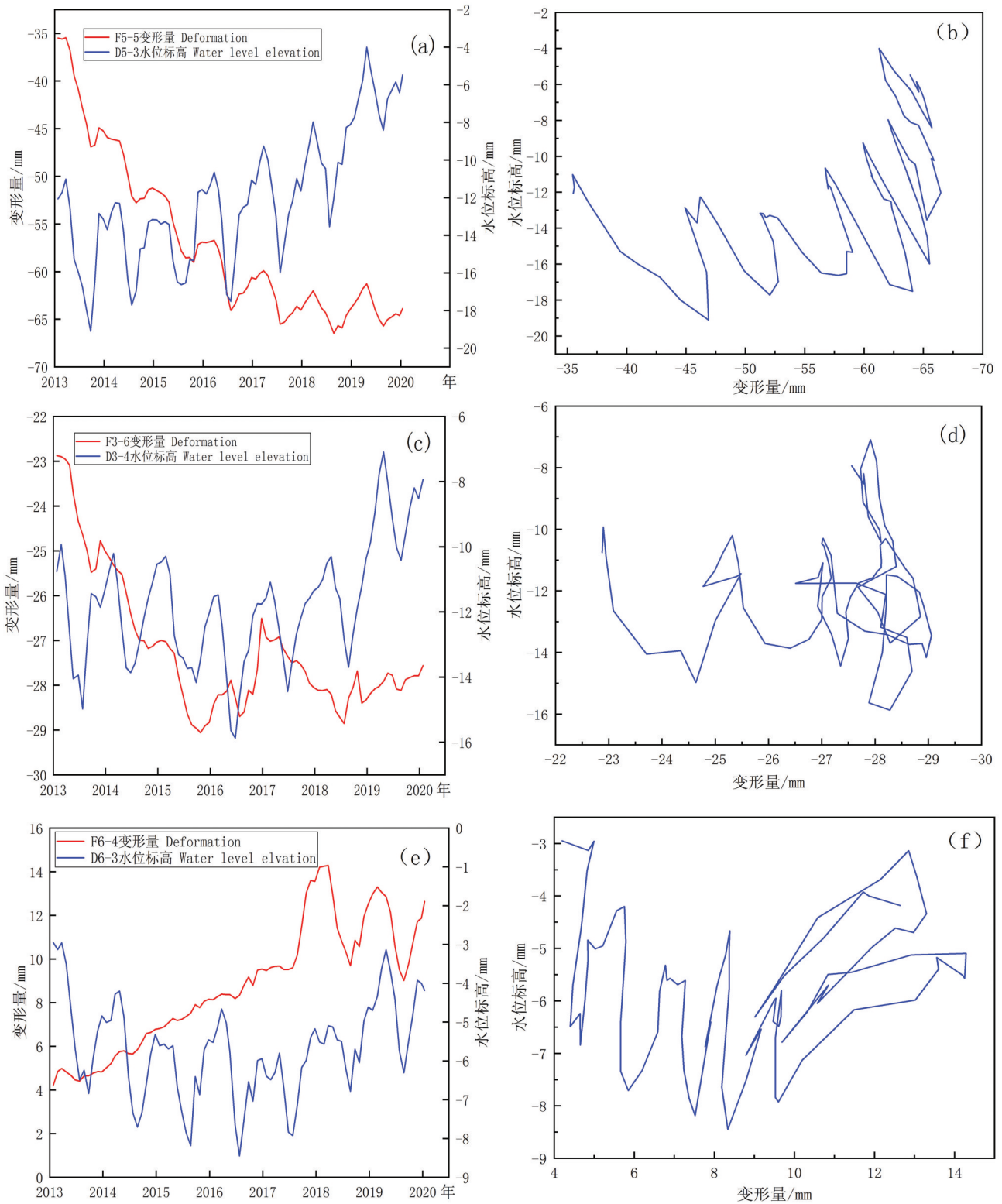


图 12 2014—2020年深部不同分层标土体形变与水位变化趋势线(a、c、e),以及不同分层标土体形变与水位关系(b、d、f)
Fig.12 Variation trends of soil deformation and groundwater level at different deep extensormeter during 2014–2020 (a, c, e), and the relationship between them (b, d, f)

5.04 mm/a,回弹范围由于2015年的4 km²扩大到2019年的266.8 km²,回弹范围与地下水上升区等水位线基本吻合。

(3)地下水回补影响范围内,潮白河冲积扇中上游地区不同岩性土层在地下水回升模式下,土体压缩持续减缓或回弹。潮白河冲积扇下游地区未受到地下水补给,水位持续下降,土体形变持续压缩。

致谢:在项目研究和成文过程中,得到北京市地质环境监测所刘久荣、罗勇和王树芳三位教授级高工以及地面沉降研究中心全体成员的帮助,同时感谢审稿专家提供宝贵的修改意见。

References

- Burbey T J. 2001. Stress-strain analyses for aquifer-system characterization[J]. *Ground Water*, 39(1): 128-136.
- Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Luan Yigbo, Liang Yanan. 2009. Quaternary geological features of Beijing piedmont plain using 3-D structural method[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 1047-1057 (in Chinese with English abstract).
- Chen Beibei, Gong Huili, Lei Kunchao, Li Xiaojuan, Zhou Chaofan, Gao Minglang, Guan Hongliang, Lü Wei. 2019. Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 75: 54-67.
- Cheng Lingpeng, Wang Zixun, Wang Xinhui, Bi Ran, Luo Yong, Yang Feng. 2018. New trend of groundwater and land subsidence in typical areas after the South-to-North water transfer into Beijing[J]. *Yellow River*, 40(7): 82-87 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Rui, Zhu Lin, Zhou Jiahui, Guo Gaoxuan, Guo Lin, Li Huijun, Chen Beibei. 2021. Spatio-temporal heterogeneity and driving factors of land subsidence in middle-lower part of Chaobai River alluvial fan[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 51(4): 1182-1192(in Chinese with English abstract).
- Guo Gaoxuan, Hou Quanlin, Xu Liang, Liu Jiurong, Xin Baodong. 2014. Delamination and zoning characteristics of Quaternary groundwater in Chaobai Alluvial-proluvial fan, Beijing, based on hydrochemical analysis[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(2): 204-210(in Chinese with English abstract).
- Guo Haipeng, Li Wenpeng, Wang Liya, Chen Ye, Zang Xisheng, Wang Yunlong, Zhu Juyan, Bian Yueyue. 2021. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(3): 162-171(in Chinese with English abstract).
- Jia Sanman, Wang Haigang, Zhao Shousheng, Luo Yong. 2007. A tentative study of the mechanism of land subsidence in Beijing[J]. *Urban Geology*, 2(1): 20-26(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuan, Tian Fang, Luo Yong, Wang Rong, Yang Yan. 2015. Research on the relationship between groundwater level and layered subsidence in typical regions of Beijing[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 13(1): 95-99(in Chinese with English abstract).
- Lei Kunchao, Luo Yong, Chen Beibei, Guo Gaoxuan, Zhou Yi. 2016. Distribution characteristics and influence factors of land subsidence in Beijing area[J]. *Geology in China*, 43(6): 2216-2228 (in Chinese with English abstract).
- Lei Kunchao, Luo Yong, Liu He, Wang Xinhui, Cui Wenjun, Tian Miaozhuang, Qi Minghuan. 2020. Land subsidence monitoring report of Beijing in 2020[R]. Beijing: Beijing institute of Hydrogeology and Engineering Geology (Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring) (in Chinese).
- Li Hong, Xiao Guoqiang, Ying Jilong, Zhao Changrong, Xiao Yi. 2016. Precise identification of land-subsiding layers and reconstruction of subsidence process in Tianjin Binhai New Area[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(10): 1646-1652(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongwei, Du Dong, Xu Jingbo, Ma Zhen, Zhao Qingsong, Pei Yandong, Hu Yunzhuang, Miao Jinjie, Zhang Jing. 2018. Characteristics and affecting factors of land subsidence identification based on PSInSAR measures in Shandong Peninsula Blue-Yellow Overlapping Economic Zone[J]. *Geology in China*, 45(6): 1116-1127(in Chinese with English abstract).
- Liu Yu, Ye Chao, Jia Sanman. 2007. Division of water-bearing zones and compressible layers in Beijing's land subsidence areas[J]. *City Geology*, (1): 10-1(in Chinese with English abstract).
- Luo Yong, Lei Kunchao, Cui Wenjun, Liu He, Tian Miaozhuang, Wang Xinhui, Qi Minghuan. 2019. Land subsidence monitoring report of Beijing in 2019[R]. Beijing: Beijing institute of Hydrogeology and Engineering Geology (Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring)(in Chinese with English abstract).
- Qin Huanhuan. 2019. Numerical simulation and scenario analysis of land subsidence in Beijing Plain[J]. *Geological Science and Technology Information*, 38(1): 221-227(in Chinese with English abstract).
- Tian Fang, Guo Meng, Luo Yong, Zhou Yi, Jia Sanman. 2012. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing[J]. *Geology in China*, 39(1): 236-242(in Chinese with English abstract).
- Tian Fang, Luo Yong, Zhou Yi, Li Yu, Jiang Yuang, Wang Rong. 2017. Contrastive analysis of spatial-temporal evolution between land subsidence and groundwater exploitation in Beijing[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 15(2): 163-169(in Chinese with English abstract).
- Wang Yunlong, Chen Ye, Guo Haipeng, Wang Jing, Wang Haigang,

- Zang Xisheng, Zhu Juyan. 2023. A study of the critical groundwater level related to soil consolidation characteristics of land subsidence in Cangzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*. DOI: 10.16030/j.cnki.issn. 1000-3665. 202208040 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xia, Liu Yuanyuan, Zhao Zhenyu. 2021. Land subsidence monitoring after the start of the South to North Water Transfer in the Beijing plain based on multi-temporal InSAR[J]. *Progress in Geophysics*, 36(6): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Yang Yan, Wang Rrong, Luo Yong. 2016. A study on soil compression characteristics in land subsidence areas within Beijing[J]. *Geoscience*, 30(3): 716-722(in Chinese with English abstract).
- Ye Shujun, Luo Yun, Wu Jichun, Yan Xuexin, Wang Hanmei, Jiao Xun, Teatine Pietro. 2016. Three-dimensional numerical modeling of land subsidence in Shanghai, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 24(3): 695-709.
- Zhao Hongyi, Liu Wenguang, Sun Chunyuan, Jiao Zhongzhi, Li Minshi, Wang Sufen, Liu Cuizhu. 2014-2020. Beijing Water Resources Bulletin[R]. Beijing: Beijing Water Authority (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chaodong, Gong Huili, Zhang Youquan, Wu Xun. 2017. Land subsidence monitoring in Beijing plain with PS-InSAR Techniques[J]. *Remote Sensing Information*, 32(1): 17-22(in Chinese with English abstract).
- Zhou Chaofan, Gong Huili, Chen Beibei, Guo Lin, Gao Mingliang. 2017. Study of temporal and spatial characteristics of land subsidence in Beijing[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 19(2): 205-215(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yi, Luo Yun, Guo Gaoxuan, Luo Yong, Lei Kunchao, Wang Rong. 2016a. A study of the characteristics of land subsidence and the main control factors in the alluvial plain: A case study of Beijing plain[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(12): 2100-2110 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yi, Guo Gaoxuan, Zhang Lei, Cai Xiangmin, Lei Kunchao. 2016b. The division of Quaternary strata and tectonic evolution in Houshayu Sag of Beijing[J]. *Geology in China*, 43(3): 1067-1075 (in Chinese with English abstract).
- 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃. 2021. 华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J]. *水文地质工程地质*, 48(3): 162-171.
- 贾三满, 王海刚, 赵守生, 罗勇. 2007. 北京地面沉降机理研究初探[J]. *城市地质*, 2(1): 20-26.
- 姜媛, 田芳, 罗勇, 王荣, 杨艳. 2015. 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*, 13(1): 95-99.
- 雷坤超, 罗勇, 陈蓓蓓, 郭高轩, 周毅. 2016. 北京平原区地面沉降分布特征及影响因素[J]. *中国地质*, 43(6): 2216-2228.
- 雷坤超, 罗勇, 刘贺, 王新惠, 崔文君, 田苗壮, 齐鸣欢. 2020. 北京市地面沉降监测年度报告(2020年)[R]. 北京: 北京市水文地质工程地质大队(北京市地质环境监测总站).
- 李红, 肖国强, 杨吉龙, 赵长荣, 肖艺. 2016. 天津滨海新区地面沉降层位的精准识别与沉降过程重建[J]. *地质通报*, 35(10): 1646-1652.
- 刘宏伟, 杜东, 许静波, 马震, 赵青松, 裴艳东, 胡云壮, 苗晋杰, 白耀楠, 张竞. 2018. 基于PSInSAR技术的山东半岛蓝黄交汇区地面沉降发育特征与影响因素识别[J]. *中国地质*, 45(6): 1116-1127.
- 刘予, 叶超, 贾三满. 2007. 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*, (1): 10-1.
- 罗勇, 雷坤超, 崔文君, 刘贺, 田苗壮, 王新惠, 齐鸣欢. 2019. 北京市地面沉降监测年度报告(2019年)[R]. 北京: 北京市水文地质工程地质大队(北京市地质环境监测总站).
- 秦欢欢. 2019. 北京平原地面沉降数值模拟情景分析[J]. *地质科技情报*, 38(1): 221-227.
- 田芳, 郭萌, 罗勇, 周毅, 贾三满. 2012. 北京地面沉降区土体变形特征[J]. *中国地质*, 39(1): 236-242.
- 田芳, 罗勇, 周毅, 李宇, 寇文杰, 姜媛, 王荣. 2017. 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*, 15(2): 163-169.
- 王云龙, 陈晔, 郭海朋, 孟静, 王海刚, 臧西胜, 朱菊艳. 2023. 沧州地区土层固结特征与地面沉降临界水位研究[J/OL]. *水文地质工程地质*. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208040.
- 晏霞, 刘媛媛, 赵振宇. 2021. 利用时序InSAR技术监测南水进京后北京平原地区的地面沉降[J]. *地球物理学进展*, 36(6): 1-12.
- 杨艳, 王荣, 罗勇. 2016. 北京典型地面沉降区土体压缩特征研究[J]. *现代地质*, 30(3): 716-722.
- 赵泓漪, 刘文光, 孙春媛, 焦忠志, 李民诗, 王素芬, 刘翠珠. 2014-2020. 北京市水资源公报[R]. 北京: 北京市水务局.
- 周朝栋, 宫辉力, 张有全, 吴勋. 2017. 北京平原区地面沉降PS-InSAR监测[J]. *遥感信息*, 32(1): 17-22.
- 周超凡, 宫辉力, 陈蓓蓓, 郭琳, 高明亮. 2017. 北京地面沉降时空分布特征研究[J]. *地球信息科学学报*, 19(2): 205-215.
- 周毅, 罗勇, 郭高轩, 罗勇, 雷坤超, 王荣. 2016a. 冲洪积平原地面沉降特征及主控因素——以北京平原为例[J]. *地质通报*, 35(12): 2100-2110.
- 周毅, 郭高轩, 张磊, 蔡向民, 雷坤超. 2016b. 北京后沙峪凹陷的第四纪地层划分与构造演化[J]. *中国地质*, 43(3): 1067-1075.

附中文参考文献

- 蔡向民, 郭高轩, 栾英波, 梁亚楠. 2009. 北京山前平原区第四系三维结构调查方法研究[J]. *地质学报*, 83(7): 1047-1057.
- 程凌鹏, 范子训, 王新惠, 毕然, 罗勇, 杨锋. 2018. 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*, 40(7): 82-87.
- 程蕊, 朱琳, 周佳慧, 郭高轩, 郭琳, 李蕙君, 陈蓓蓓. 2021. 北京潮白河冲洪积扇地面沉降时空异质性特征及驱动因素分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 51(4): 1182-1192.
- 郭高轩, 侯泉林, 许亮, 刘久荣, 辛宝东. 2014. 北京潮白河冲洪积扇地下水水化学的分层分带特征[J]. *地球学报*, 35(2): 204-210.