

# 地下水人工回灌和停采对地面沉降控制的影响分析

罗勇<sup>1</sup>, 田芳<sup>1</sup>, 秦欢欢<sup>2</sup>, 崔文君<sup>1</sup>, 欧志亮<sup>1</sup>, 孙爱华<sup>1</sup>, 田苗壮<sup>1</sup>

(1. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013)

**摘要:** 地面沉降是全世界主要的工程地质灾害之一,而地下水超采是造成地面沉降的主要原因之一。为研究地下水人工回灌和停采对北京平原地面沉降的影响,采用三维地下水模型和情景设计法,设计3个情景(保持现状、人工回灌和地下水停采)对北京平原区域及沉降中心的沉降速率进行模拟。结果表明:保持现状、人工回灌和地下水停采等情景下北京平原在2015、2020和2030年的区域地面沉降分别为24 mm/a左右、12.7~23.2 mm/a及12.4~23.7 mm/a,沉降中心地面沉降分别为39.30~158.62 mm/a、21.09~165.83 mm/a及16.5~162.95 mm/a;人工回灌和地下水停采对研究区地下水水位和含水层储存量的恢复以及地面沉降的控制有显著的促进作用,但地下水停采的效果要优于人工回灌的效果;只有综合考虑社会经济发展和地面沉降控制,才能既控制地面沉降的恶化,又保证北京平原社会的可持续发展。

**关键词:** 地面沉降控制; 人工回灌; 地下水停采; 北京平原

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0052-06

## Effects of groundwater artificial recharge and the termination of groundwater exploitation on land subsidence control

LUO Yong<sup>1</sup>, TIAN Fang<sup>1</sup>, QIN Huanhuan<sup>2</sup>, CUI Wenjun<sup>1</sup>, OU Zhiliang<sup>1</sup>,  
SUN Aihua<sup>1</sup>, TIAN Miaozhuang<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Land subsidence is one of the major engineering geological disasters in the world, while groundwater overexploitation is one of the main causes of land subsidence. In order to study the influence of artificial recharge and the termination of groundwater exploitation on land subsidence of Beijing plain, three scenarios of business as usual (BAU), artificial recharge (AR) and the termination of exploitation (TE) were designed to simulate the regional and central subsidence rate based on the 3D groundwater flow model and scenario analysis method. The results showed that the regional land subsidence rates under the scenarios of BAU, AR, and TE in the Beijing plain in 2015, 2020, and 2030 were about 24 mm/a, 12.7–23.2 mm/a, and 12.4–23.7 mm/a, respectively. The land subsidence rates at the subsidized centers in 2015, 2020, and 2030 were 39.30–158.62 mm/a, 21.09–165.83 mm/a, and 16.5–162.95 mm/a respectively. AR and TE played significant roles in promoting the recovery of groundwater level and aquifer storage as well as the control of land subsidence in the study area, but the effect of TE is better than that of AR. Only by comprehensively considering social and economic development and land subsidence control can the deterioration of land subsidence be controlled and the sustainable development of Beijing plain society be guaranteed.

**Key words:** land subsidence control; artificial recharge; the termination of groundwater exploitation; Beijing plain

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-06-05

基金项目: 北京市科技计划课题(Z191100001419007); 国家重点研发计划课题(2017YFB0503803); 北京市财政项目(PXM2019\_158305\_000012); 国家自然科学基金项目(41807179); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DH-BK2016104)

作者简介: 罗勇(1979-), 男, 四川仁寿人, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为地面沉降和地裂缝监测与研究。

通讯作者: 秦欢欢(1986-), 男, 江西南昌人, 博士, 讲师, 研究方向: 水文学与水资源。

## 1 研究背景

作为目前世界各大城市的主要工程地质灾害之一<sup>[1-2]</sup>,地面沉降严重影响城市基础设施,限制经济的可持续发展<sup>[3-5]</sup>,带来的负面影响包括洪水<sup>[6]</sup>、对地下和地面基础设施(如管道和建筑物)结构和基础的损坏<sup>[7]</sup>、地表形态的变化<sup>[8]</sup>及地裂缝的产生<sup>[9,10]</sup>。在最近的 40 年里,世界各地记录了 200 多起地面沉降事件,研究人员在数量和质量上进行了广泛的调查<sup>[3,7,11-13]</sup>。中国的地面沉降主要发生在大中型城市,正在成为一个严重的环境地质问题。中国最早的地面沉降发生在 1921 年的上海,迄今为止,全国共有 96 个地区和城市发生了面积总计  $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2$  的不同程度的地面沉降问题<sup>[14-16]</sup>,上海、苏州、西安等城市的最大沉降量甚至大于 2 m。正是由于地面沉降可能对地质、环境、水文地质和经济等造成影响<sup>[17]</sup>,因此,世界范围内发生的地面沉降问题引起了广泛和重点关注。

造成地面沉降的原因有很多,包括自然因素(如地震、气候变化等)和人为因素(如地下流体资源的开发利用等),其中地下水的过度开采和地质活动是造成地面沉降的两个主要原因<sup>[4-5,7]</sup>。许多研究表明,由于易受影响的含水层系统的压实,过度的地下水开采在地面沉降中起着直接而重要的作用<sup>[3-5,7,12,17-18]</sup>。长期、大规模地过度开采地下水导致弱透水层和含水层中地下水水位的显著下降是全球范围内 150 多个国家和地区内发生地面沉降的主要原因。由于地下水超采,世界范围内有许多地区存在严重的地面沉降问题,如泰国曼谷<sup>[19]</sup>、墨西哥城<sup>[20]</sup>、中国东部和中部地区<sup>[17,21-22]</sup>及美国的休斯敦-加尔维斯顿地区<sup>[23]</sup>。目前,中国有 17 个省市出现了显著的地面沉降,包括北京、天津、上海、江苏、河北等<sup>[24]</sup>。因此,十分有必要对中国的地面沉降现象进行定量化的模拟和研究。

1935 年,地面沉降现象首先在北京被发现,其后逐步形成了多个沉降中心。由于水资源量的不足,北京市平原区经历了 30 多年的地下水超采,带来了一系列诸如地面沉降等环境问题,已经成为北京市经济社会发展的主要制约因素之一<sup>[25-26]</sup>。经过多年的发展,北京市地面沉降的分布呈现两个大区(北区和南区)、多个沉降中心的格局<sup>[7,27-28]</sup>,成为亟待解决的一个关键问题。

自 20 世纪 60 年代以来,为了控制地面沉降的发展,包括限制地下水开采、调整地下水开采的含水

层分布和开采量以及对含水层进行人工回灌<sup>[4]</sup>等在内的 3 项措施在世界范围内被广泛采用。在过去几十年里,作为管理水资源的技术方法,人工回灌已经在许多地方被成功采用<sup>[29-30]</sup>,该方法可以使地下水水位恢复,在短时间内对地面沉降控制有显著的影响。目前,针对北京平原地面沉降问题进行的研究<sup>[21-22,27-28]</sup>主要采用观测数据法和数值模拟法,较少有学者针对地下水人工回灌和停采对北京平原地下水水位恢复和地面沉降控制的影响进行研究。考虑到地下水超采是造成地面沉降问题的主要因素之一,本文在文献[7]的地下水流模型基础上,采用情景分析的方法,研究地下水人工回灌和停采对北京平原地面沉降的影响,在此基础上为北京市控制地面沉降的进一步发展提供科学的依据。

## 2 资料来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

研究区为北京市平原地区,总面积约为  $6.4 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,位于华北平原西北端。北京市包含 16 区,2013 年常住人口  $2\,114.8 \times 10^4$  人(密度为 1 289 人/ $\text{km}^2$ ),GDP 为  $19\,500.6 \times 10^8$  元(人均 93 213 元),是中国的政治、经济和文化中心。北京市属于严重缺水的特大型城市,人均水资源占有量小于  $300 \text{ m}^3$ ,远低于人均  $1\,000 \text{ m}^3$  的国际缺水标准线<sup>[26,31-32]</sup>。据统计,与 1999 年相比,2008 年底北京平原地下水平均埋深为 23 m,下降了 11 m,地下水储存量减少了  $56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。随着人口和经济社会的发展,北京市不断加大地下水的开采量,导致地下水降深的不断加大,形成了约  $998 \text{ km}^2$  的地下水降落漏斗,主要分布在朝阳区将台至顺义区米各庄一线,在第四系较薄的地方,含水层濒临疏干或半疏干状态。

### 2.2 研究方法

根据《北京地面沉降防治规划(2013-2020 年)》,北京市地面沉降防治的目标为:区域地面沉降速率在 2015 年和 2020 年分别不超过 25 和 15 mm/a,沉降中心地面沉降速率在 2015 年和 2020 年分别不超过 45 和 30 mm/a。

研究区共分为 7 个计算分区,分别是弱发育区、榆垓、礼贤、望京、八仙庄、天竺和王四营<sup>[33]</sup>,其中后 3 个计算分区(八仙庄、天竺和王四营)采用监测站分层标与含水层水位拟合公式进行计算,其余 4 个计算分区(弱发育区、榆垓、礼贤、望京)采用经验估算法进行计算<sup>[33]</sup>。计算分区和计算方法的具体细节可参阅文献[33]。

本研究在已建立并校准的1995–2014年北京平原三维非稳态地下水模型<sup>[7, 33]</sup>基础上进行,该模型利用MODFLOW软件将北京平原划分为9层(5个含水层和4个弱透水层)、138列和116行的网格(大小为1km×1km),采用有限差分法求解地下水流的控制方程。选择了150口观测井的地下水水位数据,采用“试错法”对非稳态地下水模型进行校准(1995–2005年)和验证(2006–2014年),结果表明研究区的地下水流模型不存在系统误差,计算水位与观测水位拟合较好,非稳态地下水模型可用于下一步的情景分析。

本文中地面沉降计算的时间为2015–2030年,共设计了保持现状(BAU)、人工回灌(AR)和地下水停采(TE)3个情景(表1)。人工回灌情景中地下水人工回灌的位置在潮白河冲洪积扇顶部,回灌时间为2015–2020年,年回灌量为 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,期间将怀柔应急水源地的地下水开采量减少至目前开采量的20%(约 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ),其他地区的地下水开采量与保持现状情景相同。在地下水停采情景中,针对地面沉降中心,只减少用于工业和生活目的的地下水开采量,而用于农业目的的地下水开采量则不作改变。

表1 地面沉降计算情景设计对比表

情景	情景描述	开采量/ $10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$
保持现状(BAU)	保持现状的开采量	21.67
人工回灌(AR)	2015–2020年在潮白河冲洪积扇顶部回灌一定量( $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ )南水北调的余水	20.82
地下水停采(TE)	八仙庄、天竺和王四营3个区停采,其他区保持现状开采	17.00

### 3 结果与分析

#### 3.1 区域地面沉降量

表2为保持现状、人工回灌和地下水停采3种情景下北京平原7个计算分区的地面沉降速率,图1为这3种情景下北京平原的区域地面沉降速率。从表2可以看出,相比于保持现状的情景,人工回灌情景和地下水停采情景下所有计算分区均控制了地面沉降的增长(下降或持平),未造成地面沉降现象恶化,但地下水停采对地面沉降控制的效果要好于人工回灌的效果。由图1可看出,2015年3种开采情景下研究区的区域地面沉降速率在24.3~24.8 mm/a;2020年各情景下研究区的区域地面沉降速率在12.7~23.2 mm/a,最大的是保持现状情景BAU(23.2 mm/a),最小的为地下水停采情景TE(12.7 mm/a);而对于2030年各情景下研究区的区域地面沉降速率在12.4~23.7 mm/a,保持现状情景BAU的区域沉降速率最大(23.7 mm/a),地下水停采情景TE的区域沉降速率最小(12.4 mm/a)。

#### 3.2 沉降中心地面沉降量

研究区共有7个地面沉降中心,分布在朝阳区(金盏、三间房及黑庄户)、海淀区(西小营)、昌平区(八仙庄)、通州区(通州城区)和大兴区(礼贤)等行政区,表3列出了模拟期内各情景下北京平原沉降中心的地面沉降速率。从表3可以看出,对于所

有地面沉降中心,人工回灌和地下水停采都会使得地面沉降速率下降或持平。具体来说,在2015年,保持现状情景下研究区的地面沉降速率为39.30~158.62 mm/a,人工回灌情景下研究区的地面沉降速率为39.30~158.62 mm/a,地下水停采情景下研究区的地面沉降速率为39.30~155.45 mm/a;在2020年,保持现状情景下研究区的地面沉降速率为27.50~165.83 mm/a,人工回灌和地下水停采情景下研究区的地面沉降速率则分别为27.50~165.83 mm/a和21.09~29.34 mm/a;在2030年,保持现状情景下研究区的地面沉降速率为16.50~162.95 mm/a,人工回灌和地下水停采情景下研究区的地面沉降速率则分别为16.50~162.95 mm/a和16.50~24.44 mm/a。

表2 各情景下北京平原计算分区的地面沉降速率

计算分区	mm/a								
	2015年			2020年			2030年		
	BAU	AR	TE	BAU	AR	TE	BAU	AR	TE
弱发育区	12.1	12.1	12.1	11.4	11.4	11.4	11.6	11.6	11.6
榆垓	24.5	24.5	24.5	22.9	22.9	22.9	23.4	23.4	23.4
礼贤	74.7	74.7	74.7	70.0	70.0	29.4	71.6	71.6	29.3
望京	42.5	42.5	40.3	39.7	15.9	7.9	40.6	24.4	7.7
八仙庄	64.3	64.3	61.8	60.2	30.1	12.0	61.6	46.2	11.7
天竺	50.8	45.8	48.3	47.6	23.8	22.8	48.7	36.5	19.5
王四营	98.6	98.6	95.6	92.3	64.6	13.8	94.4	99.1	9.4

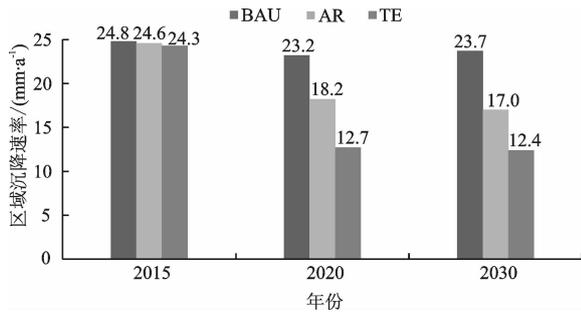


图 1 不同情景下北京平原区域地面沉降速率

### 3.3 人工回灌和地下水停采的影响

人工回灌和地下水停采均对研究区的地下水各含水层水位(图 2)和地下水含水层储量(图 3)的

恢复有着显著的影响。相比于保持现状情景,人工回灌和地下水停采情景下北京平原 5 个含水层中观测点的地下水水位均有不同程度的恢复,同时也使得地下水储量有不同程度的恢复。地下水停采情景对地下水水位和含水层储量的影响要大于人工回灌情景,这是因为一方面人工回灌只是在局部地区(潮白河冲洪积扇顶部)、部分时间(2015 - 2020 年)进行,另一方面地下水停采情景停采的是沉降中心的工业和生活开采量,停采量比较大,效果比较明显。值得关注的是,由于人工回灌的时间是 2015 - 2020 年,图 3 中人工回灌情景和保持现状情景在 2021 - 2030 年的曲线是重合的。

表 3 各情景下北京平原沉降中心的地面沉降速率

mm/a

沉降中心	2015 年			2020 年			2030 年		
	BAU	AR	TE	BAU	AR	TE	BAU	AR	TE
八仙庄	103.95	103.95	98.75	108.68	54.34	29.34	106.79	106.79	20.29
西小营	93.50	93.50	91.63	97.75	87.98	24.44	96.05	96.05	17.29
金盏	156.20	156.20	148.39	163.30	122.48	24.50	160.46	160.46	24.07
三间房	147.51	147.51	141.61	154.22	154.22	23.13	151.53	151.53	22.73
黑庄户	158.62	158.62	155.45	165.83	165.83	23.22	162.95	162.95	24.44
通州城区	100.87	100.87	96.84	105.46	105.46	21.09	103.62	103.62	20.72
礼贤	39.30	39.30	39.30	27.50	27.50	27.50	16.50	16.50	16.50

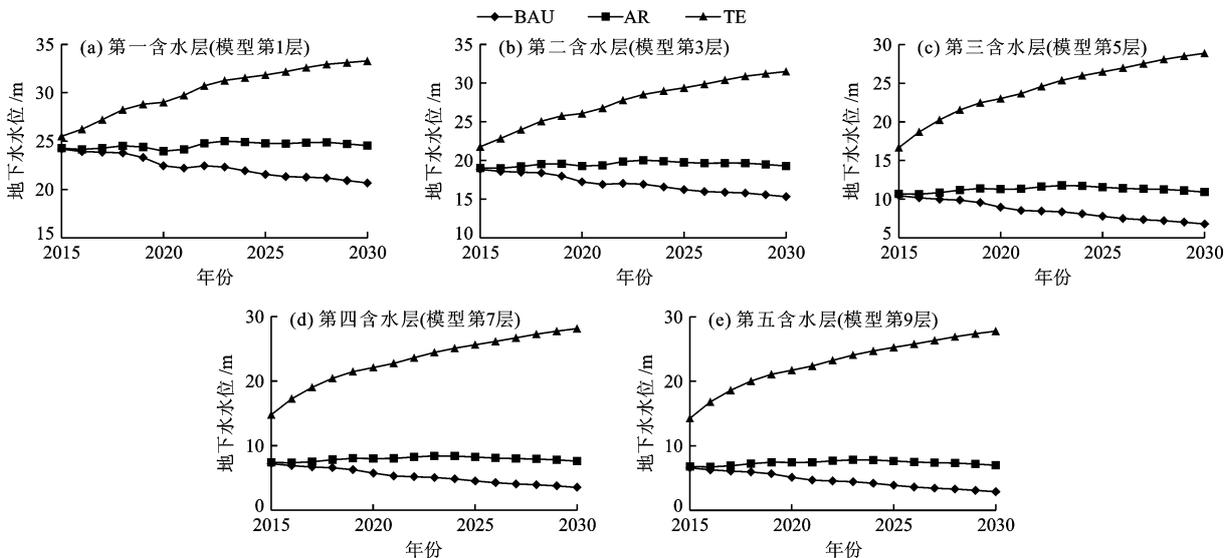


图 2 2015 - 2030 年保持现状、人工回灌和地下水停采情景下北京平原地下水各含水层水位恢复情况

保持现状、人工回灌和地下水停采情景下含水层平均储量变化分别为  $-1.16 \times 10^8$ 、 $-0.28 \times 10^8$  和  $3.52 \times 10^8 \text{ m}^3$  (正数表示增加,负数表示减少,下同),含水层最大储量变化分别为  $-5.84 \times$

$10^8$ 、 $-5.84 \times 10^8$  和  $7.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。相对于保持现状情景,人工回灌和地下水停采情景的含水层平均储量变化分别增加  $0.88 \times 10^8$  和  $4.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。相对于模拟期初,人工回灌情景下模拟期末不同含

水层地下水水位恢复量在  $-0.008 \sim 0.027$  m, 地下水停采情景下模拟期末不同含水层地下水水位恢复量在  $8.162 \sim 17.548$  m。地下水停采情景的效果比人工回灌情景的效果要好, 但完全停采工业和生活地下水开采并不可行。

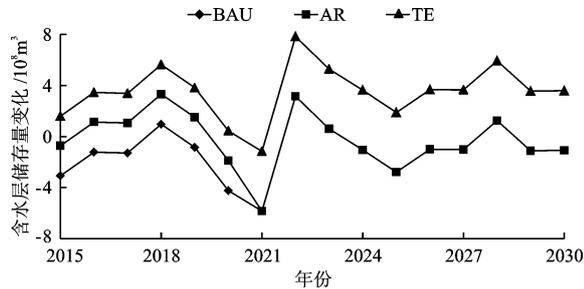


图3 2015-2030年保持现状、人工回灌和地下水停采情景下北京平原地下水含水层储量变化

与此同时, 人工回灌和地下水停采均能有效降低区域地面沉降率和沉降中心地面沉降, 但效果不同(表4)。相对于现状保持情景, 人工回灌情景下区域地面沉降分别下降0.8% (2015年)、21.6% (2020年)和28.3% (2030年), 地下水停采情景下区域地面沉降分别下降2.0% (2015年)、45.3% (2020年)和47.7% (2030年); 而人工回灌情景下沉降中心地面沉降分别为持平(2015年)、下降0~50% (2020年)及持平(2030年), 地下水停采情景下沉降中心地面沉降分别下降0~5% (2015年)、0~86% (2020年)和0~85% (2030年)。

表4 相对于保持现状情景的地面沉降变幅 %

区域及沉降中心	2015年		2020年		2030年	
	AR	TE	AR	TE	AR	TE
区域	-0.8	-2.0	-21.6	-45.3	-28.3	-47.7
八仙庄	0	-5.0	-50.0	-46.0	0	-81.0
西小营	0	-2.0	-10.0	-72.2	0	-82.0
金盏	0	-5.0	-25.0	-80.0	0	-85.0
三间房	0	-4.0	0	-85.0	0	-85.0
黑庄户	0	-2.0	0	-86.0	0	-85.0
通州城区	0	-4.0	0	-80.0	0	-80.0
礼贤	0	0	0	0	0	0

总体上来看, 对于地面沉降控制的影响, 地下水停采的效果要比人工回灌效果显著。这是因为: (1) 地下水停采针对的是区域层面, 而人工回灌针对的是局部层面, 两者的作用范围不同; (2) 地下水停采持续的时间是整个模拟周期, 而人工回灌则只在2015-

2020年起作用。然而, 地下水停采对研究区经济社会发展的限制较多, 容易造成对社会发展的阻碍作用, 需谨慎采用。只有综合考虑社会经济发展和地面沉降控制, 将人工回灌和地下水停采相结合, 才能既防止地面沉降的恶化, 同时又保证北京平原社会的可持续发展。

## 4 结论

(1) 保持现状、人工回灌和地下水停采等3个情景下北京平原区域地面沉降分别为2015年24 mm/a左右, 2020年12.7~23.2 mm/a, 2030年12.4~23.7 mm/a; 而沉降中心地面沉降分别为2015年39.30~158.62、39.30~158.62和39.30~155.45 mm/a, 2020年27.5~165.83、27.5~165.83和21.09~29.34 mm/a, 2030年16.5~162.95、16.5~162.95和16.5~24.44 mm/a。

(2) 人工回灌和地下水停采均对研究区地下水水位和含水层储存量的恢复有着显著的影响, 3种情景下含水层平均储量变化分别为  $-1.16 \times 10^8$ 、 $-0.28 \times 10^8$  和  $3.52 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。相对于模拟期初, 人工回灌情景下模拟期末不同含水层地下水水位恢复量在  $-0.008 \sim 0.027$  m, 地下水停采情景下模拟期末不同含水层地下水水位恢复量在  $8.162 \sim 17.548$  m。

(3) 总体上来看, 对于地面沉降控制的影响, 地下水停采的效果要比人工回灌效果显著。只有综合考虑社会经济发展和地面沉降控制, 将两者相结合, 才能既防止地面沉降的恶化, 又保证北京平原社会的可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] GALLOWAY D L, BURBEY T J. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(8): 1459-1486.
- [4] SHI Xiaoqing, JIANG Simin, XU Hongxia, et al. The effects of artificial recharge of groundwater on controlling land subsidence and its influence on groundwater quality and aquifer energy storage in Shanghai, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 1-18.

- [5] XUE Yuqun, ZHANG Yun, YE Shujun, et al. Land subsidence in China[J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(6):713 – 720.
- [6] RODOLFO K S, SIRINGAN F P. Global sea – level rise is recognized, but flooding from anthropogenic land subsidence is ignored around northern Manila Bay, Philippines[J]. *Disasters*, 2006, 30(1):118 – 139.
- [7] QIN Huanhuan, ANDREWS C B, TIAN Fang, et al. Groundwater – pumping optimization for land – subsidence control in Beijing plain, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(4):1061 – 1081.
- [8] MOE I R, KURE S, JANURIYADI N F, et al. Future projection of flood inundation considering land – use changes and land subsidence in Jakarta, Indonesia[J]. *Hydrological Research Letters*, 2017, 11(2):99 – 105.
- [9] BUDHU M. Mechanics of earth fissures using the Mohr – Coulomb failure criterion[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2008, 14(4):281 – 295.
- [10] BUDHU M. Earth fissure formation from the mechanics of groundwater pumping[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2011, 11(1):1 – 11.
- [11] HELM D C. One – dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California. 2 Stress – dependent parameters [J]. *Water Resources Research*, 1976, 12:375 – 391.
- [12] BELL J W, AMELUNG F, FERRETTI A, et al. Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long – term aquifer – system response to groundwater pumping and artificial recharge[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44:W02407.
- [13] USTUN A, TUSAT E, YALVAC S. Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006 – 2009 by means of GNSS observations[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2010, 10(6):1151 – 1157.
- [14] 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.
- [15] 杨林权. 荷载和地下水开采作用下的地面沉降数值模拟及应用研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2014.
- [16] 李 辉. 地下水诱发地面沉降数值模拟分析研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [17] CAO Guoliang, HAN Dongmei, MOSER J. Groundwater exploitation management under land subsidence constraint: empirical evidence from the Hangzhou – Jiaying – Huzhou plain, China[J]. *Environmental Management*, 2013, 51(6):1109 – 1125.
- [18] ABIDIN H Z, GUMILAR I, ANDREAS H, et al. Study on causes and impacts of land subsidence in Bandung basin, Indonesia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(6):1545 – 1553.
- [19] AOBPAET A, CUENCA M C, HOOPER A, et al. InSAR time – series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand[J]. *International Journal for Remote Sensing*, 2013, 34(8):2969 – 2982.
- [20] ORTIZ – ZAMORA D, ORTEGA – GUERRERO A. Evolution of long – term land subsidence near Mexico City: review, field investigations, and predictive simulations[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(1):183 – 186.
- [21] 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.
- [22] 周超凡,宫辉力,陈蓓蓓,等. 北京地面沉降时空分布特征研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017,19(2):205 – 215.
- [23] LARSON J R, DZIUK L J. Groundwater to surface water conversion in the Houston – Galveston region: impact of mandates on water quality, subsidence and water rates[J]. *Risk Analysis*, 1995,15(5):545 – 554.
- [24] 殷跃平,张作辰,张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*,2005,16(2):1 – 8.
- [25] 王丽亚. 北京平原区地下水可持续利用模型研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014.
- [26] MCDONALD R I, WEBER K, PADOWSKI J, et al. Water on an urban planet: urbanization and the reach of urban water infrastructure [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 27(1):96 – 105.
- [27] ZHU Lin, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Comprehensive analysis and artificial intelligent simulation of land subsidence of Beijing, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(2):237 – 248.
- [28] ZHU Lin, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China[J]. *Engineering Geology*, 2015,193:243 – 255.
- [29] HAN Zaisheng. Groundwater resources protection and aquifer recovery in China [J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(1):106 – 111.
- [30] TU Y C, TING C S, TSAI H T, et al. Dynamic analysis of the infiltration rate of artificial recharge of ground water: a case study of Wanglong Lake, Pingtung Taiwan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(1):77 – 85.
- [31] 张士锋,孟秀敬,廖 强. 北京市水资源与水量平衡研究[J]. *地理研究*,2012,31(11):1991 – 1997.
- [32] 秦欢欢. 基于分布式水文模型和系统动力学方法的华北平原水资源可持续利用研究[D]. 北京:北京大学,2014.
- [33] 秦欢欢. 北京平原地面沉降数值模拟情景分析[J]. *地质科技情报*,2019,38(1):221 – 227.