



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.020

董佩, 李阳, 刘殷, 等. 北京基岩水开采对地面沉降的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 120-125, 176. DONG Pei, LI Yang, LIU Yin, et al. Influence of bedrock water exploitation on land subsidence in Beijing [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 120-125, 176. (in Chinese)

## 北京基岩水开采对地面沉降的影响

董佩<sup>1</sup>, 李阳<sup>2</sup>, 刘殷<sup>1</sup>, 孙颖<sup>1</sup>, 李志萍<sup>1</sup>

(1. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 2. 北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

**摘要:** 过量开采地下水造成的地面沉降问题已经是北京市平原区主要的地质灾害之一。论文选择小汤山和后沙峪地区为典型研究区, 通过分析研究区基岩水开发利用状况, 开展基岩水开采引起地面沉降的研究。运用简化的弹性模型评估基岩水开采造成的弹性变形量, 结果表明, 从1974年截至2010年, 小汤山地区地热田总净开采量约9400万 $m^3$ , 引起的地面弹性变形量约为1.02 cm; 小汤山地区岩溶水年均开采3000万 $m^3$ , 年均形变量约0.32 cm。后沙峪地区通过估算获得近似值, 1961年-2011年期间由于第四系地下水的开采造成的基岩变形量约为1.09 cm。

**关键词:** 地面沉降; 基岩水; 小汤山; 地热田; 弹性模型

**中图分类号:** P641.8    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0120-06

### Influence of bedrock water exploitation on land subsidence in Beijing

DONG Pei<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>, LIU Yin<sup>1</sup>, SUN Ying<sup>1</sup>, LI Zhi ping<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China;

2. Beijing Institute of Geological and Prospecting Engineering, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Land subsidence induced by excessive groundwater withdrawal has constituted a major environmental geological problem in Beijing's plain areas. This paper selected Xiaotangshan and Houshayu areas as typical research areas. By analyzing the development and utilization of bedrock water, we carried out research on the land subsidence induced by bedrock water exploitation. A simplified elastic model was used to assess the amount of elastic deformation caused by bedrock water exploitation. The results showed that from 1974 to 2010, the total exploitation of Xiaotangshan geothermal field was about 94 million cubic meters and the exploitation led to about 1.02 cm elastic deformation; the exploitation of Xiaotangshan karst water reached 30 million cubic meters annually, causing an average annual deformation of about 0.32 cm. Approximate values of the Houshayu area was obtained through estimation, and the accumulated elastic deformation caused by Quaternary groundwater exploitation was about 1.09 cm in the period from 1961 to 2011.

**Key words:** land subsidence; bedrock water; Xiaotangshan; geothermal field; elastic model

地面沉降是在自然和人为因素的作用下, 由于地表松散土体的压缩而导致区域性地面高程下降的一种环境地质现象, 是孔隙水承担的孔隙水压力和土骨架承担的有效应力发生变化的结果。随着全球气候变暖以及城市化进程的加速, 人为因素在地面沉降中的作用日益凸显, 特别是大规模持续地开发利用地下水导致区域性的地面沉降迅速发展, 成为

地面沉降的主要影响因素<sup>[1-3]</sup>。

目前地下水在北京城市供水中占2/3强。地下水的高强度开采, 支撑着北京市的繁荣和稳定, 而其带来的地面沉降问题日趋严重。2009年-2012年, 北京年度平均降水分别为484.96 mm、497.10 mm、640.19 mm和653.20 mm, 呈逐年增多的态势, 但是大范围的地面沉降却没有出现预期的减缓。降水

收稿日期: 2016-01-26    修回日期: 2016-05-18    网络出版时间: 2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1116.008.html>

作者简介: 董佩(1985-), 女, 河南沁阳人, 博士, 主要从事水-气二相渗流研究。E-mail: dongpei1985@126.com

量的增加对浅部含水层(尤其是潜水)的补给是明显的,在浅层地面沉降量较大的地区,当浅部地层水位上升时,浅部地层沉降的减缓必然带动总沉降量得以减缓。但应该看到,这种减缓的幅度是有限的,并没有改变深部地层地下水持续下降的趋势。这既和深部地下水的补给困难有关系,更主要的是由于目前地下水开采逐步加深,引起深部地层沉降加速。

本文将京北小汤山和后沙峪地区作为典型研究区,受地下水开采影响,研究区地下水水位逐年下降,地下水水位变化引起了地层的弹性、黏弹性变形,并受开采情况和地层岩性、厚度等因素影响,造成水平上的差异性地面沉降。而在垂向上,该区域内深层地下水的开采量较大,以往对于深层水,特别是基岩水开采引起含水层变形造成地面沉降的监测和研究工作都开展较少。本次工作尝试通过分析研究区基岩水开发利用状况,开展基岩水开采引起地层变形的研究。

## 1 研究区自然条件

研究区位于北京市北部平原地区,包括小汤山和后沙峪地区两个区域,行政区划上横跨顺义区、昌平区,西南边界平原区以南口-孙河断裂为界,山区以四桥子西梁-居庸关为界,北部边界为石泉门-松树沟-沙岭-大羊山地表分水岭,东南以顺义断裂为界(图1),属于潮白河冲洪积扇和温榆河冲洪积扇交汇地带,地势特征大致为西北高,东南低。地貌类型主要为冲洪积平原,平原以昌平北为顶点,向南呈扇形展开。

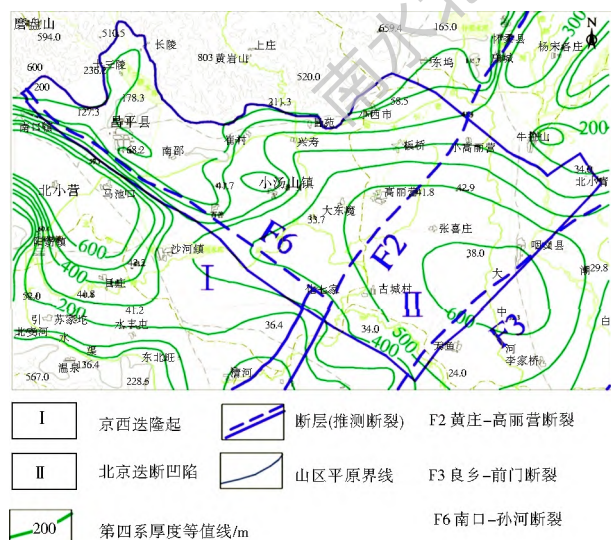


图1 研究区地质构造分区图(比例尺 1:1000)

Fig.1 Geological structure map of the study area

研究区属于温带大陆性季风气候,多年平均气温约 12℃,昌平气象站监测 1961 年-2014 年多年

平均降水量 530.9 mm。降水量多集中于 5 月-10 月,占全年总降水量的 95.87%。1979 年-2013 年多年平均蒸发量为 1691.64 mm,蒸发量主要集中在 3 月-6 月,约占全年的 50% 以上。

### 1.1 地质条件

研究区北部为北山隆起,东南部为顺义凹陷,西部为京西北隆起,地质构造上表现为扭动构造行迹。断裂主要有北东向和北西向两种构造体系,北东向构造包括黄庄-高丽营断裂、良乡-前门断裂等;北西向构造则主要是南口-孙河断裂(图1)。其中,北东向黄庄-高丽营断裂和北西向南口-孙河断裂具有较强的活动性,对新生界沉积厚度控制作用明显,是研究区的最主要断裂。集中在研究区中部的诸多断裂一方面是深部地下水的通道,同时形成的断裂破碎带也提供了良好的地下水赋存环境。

区内已揭露的地层自上而下有:第四系、侏罗系,石炭系、奥陶系、寒武系,青白口系和蓟县系雾迷山组。此外,在小汤山镇北侧阿苏卫-小汤山一线分布有燕山期形成的酸性花岗岩<sup>[49]</sup>。

### 1.2 水文地质条件

研究区地下水类型主要有两大类:第四系松散岩类孔隙潜水和基岩水。第四系孔隙水主要分布于各大河流河道中,主要含水层为中粗砂、含砂黏性土、碎石土,属冲洪积物,地下水丰富,渗透性较好;基岩水(微承压水)大部分位于稳定的基岩中,主要类型为基岩裂隙水和岩溶水。主要岩溶含水岩组有长城系、蓟县系、寒武系和奥陶系岩溶含水岩组。山前基岩地下水补给以大气降水入渗补给为主,另外当十三陵水库水位达到一定高度时,库水渗漏补给岩溶地下水,平原区主要补给来源为侧向径流补给。

## 2 地下水开发利用及地下水位监测

### 2.1 地下水开发利用概况

目前,研究区地下水开采包括引用水源地的开采和地热井的开采,平原区地下水开采深度主要集中在 300 m 以上。其中,埋深 80~100 m 的地下水以农业开采为主,埋深 150~180 m 的地下水开采主要用于生活及工业用水,埋深 200~300 m 的地下水主要是生活用水。主要岩溶水水源地有邓庄、化庄、真顺、兴寿等集中水源地,岩溶水年开采量达 2385 万 m<sup>3</sup>;另外研究区有丰富的地热资源,地热田开采利用自 1974 年,目前已有 40 年的开采历史,小汤山更有“温泉之乡”的美誉。目前研究区有热水开采井 70 多眼,年开采量 110 万 m<sup>3</sup>。主要开采三个地

层,分别为蓟县系雾迷山组、蓟县系铁岭组及寒武系地层,已有回灌井 11 眼,实施回灌地层主要为蓟县系雾迷山组和蓟县系铁岭组<sup>[10-13]</sup>。

目前,为满足日益增长的生活和生长需要,地下水正处于集中和超量开采状态。由于工作区位于北京市地下水资源相对丰富的地段,区内建设了多座水厂和用水量大的企业,且随着地热温泉优势越来越突出,一些单位的地热用水规模也迅速扩大,在没有其它新增替代水源的情况下,地下水的超量开采将随着经济的快速发展而加剧。2000 年以后,由于连续多年干旱,造成地下水位持续下降,出水量降低,同时地表水和浅层地下水的污染导致地下水开采越来越深,为了满足生活用水的需求,300 m 以上深层承压水水位下降明显,工作区内不少地区承压水水位下降速度都超过 2 m/a,最大下降速率接近 3 m/a,见图 2。

地下水水位的持续下降,造成了工作区地下水位下降漏斗扩展、单井涌水量减少、局部地区含水层发生季节性疏干,致使包气带变厚,土壤含水量减少。



图 2 后沙峪 260 m 深承压水水位变化曲线

Fig. 2 Confined water level curve at the depth of 260 m in Houshayu

## 2.2 基岩地下水水位监测

研究区现有地热井长期水位动态监测点 2 个,分别为汤热灌 1 井和苗圃观测井,分别观测雾迷山组和铁岭组水位变化。

雾迷山组压力的多年变化情况通过汤热灌 1 井的月最低水位动态曲线可以进行分析(图 3)。

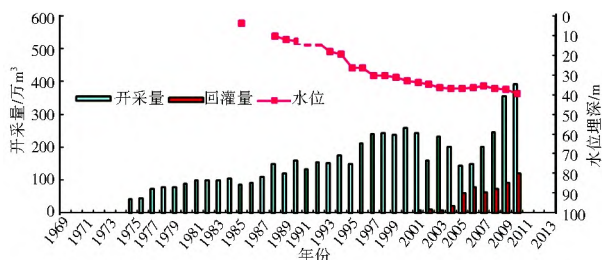


图 3 小汤山地区基岩(雾迷山组地层)多年开采量、回灌量及水位动态曲线

Fig. 3 Multiyear geothermal water exploitation, recharge, and water table at Wumishan layer of Xiaotangshan

蓟县系雾迷山组地层的开采量、回灌量和水位变化整体呈现以下几个阶段(图 3)的特征:20 世纪 80 年代初至 20 世纪 90 年代中期,开采量从不到 100 万 m<sup>3</sup>/a 逐年增加至 200 万 m<sup>3</sup>/a,热储水位迅速下降,平均降幅约 2.08 m/a,这一阶段称为快速开采期;20 世纪 90 年代中期至 2000 年回灌之前,雾迷山组开采量基本保持在 200~250 万 m<sup>3</sup>/a,水位下降速度变缓,平均降幅约 1.29 m/a,这个阶段称为稳定开采期;2001 年-2007 年,雾迷山组开采量逐渐减少到 200 万 m<sup>3</sup>/a 以内,同时开始接受回灌补给,年均回灌量从最初的不到 10 万 m<sup>3</sup>/a,迅速增加到 120 万 m<sup>3</sup>/a 左右,水位下降速度大大减缓,并且 2005 年-2007 年开始水位出现小幅抬升,这一个阶段称为开采恢复期;2008 年以后,由于雾迷山组开采量又迅速增大至 250~350 万 m<sup>3</sup>/a,回灌量仅维持在 130~140 万 m<sup>3</sup>/a,水位出现小幅下降<sup>[14]</sup>。

铁岭组地层同样是从 1974 年开始进行开采,开采规模逐年增加,到 1984 年仅为 77.25 万 m<sup>3</sup>/a,到 1990 年达到 200.85 万 m<sup>3</sup>/a,之后开采量逐渐得到控制,20 世纪 90 年代年开采量稳定在 100~200 万 m<sup>3</sup>/a。21 世纪后,随着一些国企改制,很多老井停止开采,开采量迅速减小到 100 万 m<sup>3</sup>/a 以内,之后开采量一直降低,到 2005 年更是减小到 23.17 万 m<sup>3</sup>/a(图 4)。



图 4 小汤山地区基岩(铁岭组地层)多年开采量、回灌量柱状图

Fig. 4 Multiyear geothermal water exploitation and recharge at Tieling layer of Xiaotangshan

铁岭组长期水位监测点是从 2009 年才开始实施监测的,由于缺少多年长期监测资料,目前无法对该地层的压力变化情况进行详细分析。2010 年铁岭组年平均水位比 2009 年下降 2.47 m。

寒武系地层从 1982 年进行开采,长期以来开采规模比较稳定,除了 1998 年开采量达到 73.58 万 m<sup>3</sup>/a,其余年份基本都在 60 万 m<sup>3</sup>/a 以下(图 5)。由于该地层没有水位长期监测点,无法对该地层的压力变化情况进行分析。

综上所述,由于长期大规模开发,地下水资源开

始枯竭,表现为井水位大幅度下降。在1985年-1999年间,雾迷山组地层水位由344 m降到3065 m,降幅超过27 m;铁岭组地层水位由404 m降到3190 m,降幅近28 m,寒武系地层水位由434 m降到2424 m,降幅近20 m<sup>[15]</sup>。

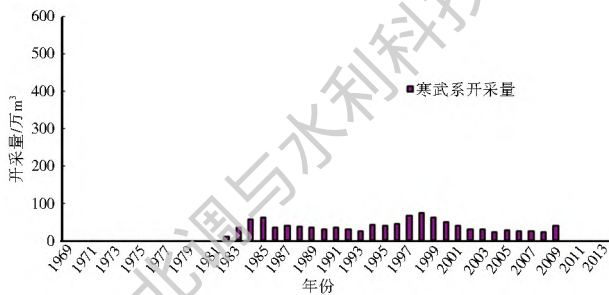


图5 小汤山地区基岩(寒武系地层)多年开采量柱状图

Fig. 5 Multiyear geothermal water exploitation at Hanwu layer of Xiaotangshan

### 3 基岩形变的模型与计算

#### 3.1 研究区地面沉降状况

从图6可以看出,研究区内地面沉降量从山区至平原逐渐增加,且地面沉降量较大的区域大部处于昌平区和顺义区的城区地段,尤其昌平八仙庄附近最为严重,根据《北京市地面沉降调查报告》昌平沙河-八仙庄沉降区最大累计沉降量已达到1233 mm。2006年-2009年,昌平沙河-八仙庄地区沉降区的中心沉降速率约为75.14 mm/a。据北京市水文队2012年度地面沉降报告分析,研究区是北京市平原区北部的的主要沉降区,其中八仙庄沉降量同期增加量大于15 mm,往年此地的沉降量已经较大,在沉降量持续增大后,年度沉降量均超过100 mm,成为平原区北部的的主要沉降中心。此外,在顺义的西马各庄地区,近年沉降量有较大幅度增加,且在持续增加中,增幅超过20 mm,成为平原区北部2012年沉降量增加最快的地区之一,最大年沉降量已经超过60 mm。此外研究区内的北七家地区,多年来一直延续着快速沉降的势头,其累计沉降量仍然是昌平沙河-八仙庄沉降区乃至全北京平原区的最大值。

#### 3.2 模型与实例

Thomas L. Holzer(1979)在分析美国加利福尼亚州等地的地面沉降现象时发现,长时间超采地下水造成含水层的弹性变形可能是造成加州地区地面沉降的原因之一<sup>[16]</sup>。文章指出,在基岩水开采条件下,由于承压水的减少,引起含水层中孔隙水压力的降低,含水层的应力增加,使得含水层的孔隙水体积缩小,压缩量应等于相应的开采量,从而引起了地面

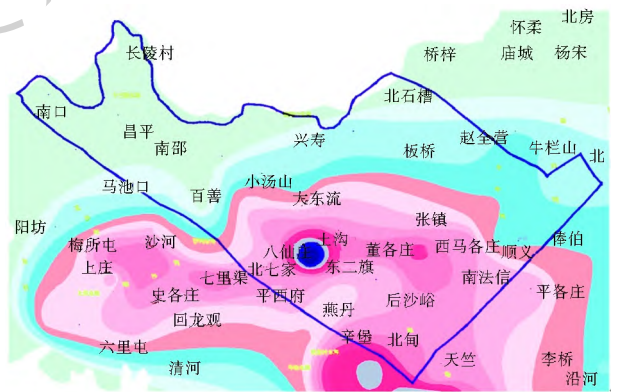


图6 研究区累计地面沉降量色斑图(颜色越重沉降量越大)

Fig. 6 The stain figure of cumulative land subsidence in the study area

沉降的发生。因此对于地面沉降量已知或者可测的地区,根据地面沉降量可获得相应的含水层开采量。承压含水层开采量可由水位、给水度与开采区面积的乘积获得。Thomas L. Holzer(1979)使用Timoshenko和Goodier的弹性力学理论对研究区由于地下水开采造成的地面沉降量进行计算,即对于均质、各向同性的半无限圆形区域,当其表面存在均布载荷时引起的最大的表面变形可由下面的简化模型获得<sup>[17]</sup>。

$$w_{\max} = \frac{2(1-\nu^2)\sigma R}{E} \quad (1)$$

式中: $w_{\max}$ 为圆形区域中心的最大变形量; $E$ 为杨氏模量; $\nu$ 为泊松比; $\sigma$ 为压强,可表示为 $mg/\pi R^2$ ;  $m$ 为荷载质量; $g$ 为重力加速度; $R$ 为圆形区域的半径。

尽管该模型只是一个简化模型,但是当评价区面积较小、开采量已知且地下水开采造成的基底形变对地面沉降的贡献较小的情况下,该模型有很大的适用空间。

上述简化模型亦可表示为

$$w_{\max} = \frac{2(1-\nu^2)g}{\pi^{1/2}E} \frac{m}{(\pi R^2)^{1/2}} \quad (2)$$

就基底变形而言,泊松比可取常量0.25<sup>[18]</sup>,杨氏模量为0.7 Mbar<sup>[19]</sup>,则从式(2)可知,研究区基岩弹性变形量的大小受开采量与区域面积的影响。

研究区地面沉降的发生以地下水的长期持续过量开采为主要诱因。抽水引起的地面沉降的机理可以用有效应力原理来解释。在孔隙承压含水层中抽取地下水引起承压水水头降低,必然要使含水层本身及其上、下相对隔水层中的孔隙水压力随之减小。在含水层上覆地层压力不变的情况下,孔隙水压力的减小导致土中有效应力等量增大,结果引起孔隙体积减小,从而使土层压缩。

近年,随着地下水的开发利用,导致了基岩水位

逐年下降,相应基岩水水位变化会引起基岩的弹性变形。尝试利用 Thomas L. Holzer(1979)的简化模型,根据工作区地下水开发利用情况评估可能引起的弹性变形。

从小汤山雾迷山组净开采量与地层最大变形量关系图(图 7)可以看出:从 20 世纪 80 年代初至 90 年代中期,随着年净开采量从不到  $100 \text{万 m}^3$  逐年增加至  $200 \text{万 m}^3$ ,雾迷山组地层的年最大变形量也相应的从  $0.0089 \text{mm}$  增大到  $0.0217 \text{mm}$ ,平均增幅约  $0.001 \text{mm/a}$ ;90 年代中期至 2000 年回灌之前,雾迷山组净开采量基本保持在  $200 \sim 260 \text{万 m}^3/\text{a}$ ,地层形变速度变缓,平均增幅约  $0.00078 \text{mm/a}$ ;随着回灌的进行,2001 年-2007 年,雾迷山组开采量逐渐减少到  $200 \text{万 m}^3/\text{a}$  以内,同时开始接受回灌补给,年均回灌量从最初的不到  $10 \text{万 m}^3$ ,迅速增加到  $120 \text{万 m}^3$  左右,地层形变增加速度大大减缓,并且 2003 年-2007 年开始年最大变形量出现直线下降,从  $0.0219 \text{mm/a}$  降到  $0.0135 \text{mm/a}$ ;2006 年以后,由于雾迷山组年开采量又迅速增大至  $250 \sim 350 \text{万 m}^3$ ,年回灌量仅维持在  $130 \sim 140 \text{万 m}^3$ ,地层形变又出现了回升。

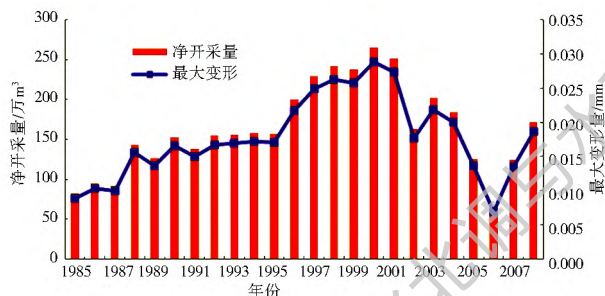


图 7 小汤山雾迷山组净开采量与地层最大变形量关系

Fig. 7 Relationship between geothermal water exploitation and maximum deformation of Wumishan layer in Xiaotangshan

铁岭组地层从 1974 年开始进行开采,开采规模逐年增加,从 1985 年  $101.54 \text{万 m}^3$ ,到 1990 年达到  $205.11 \text{万 m}^3$ ,相应的铁岭组地层年最大变形量从  $0.011 \text{mm}$  逐渐增加到  $0.0223 \text{mm}$ ,之后开采量逐渐得到控制,20 世纪 90 年代年开采量稳定在  $100 \sim 200 \text{万 m}^3$ 。21 世纪后,随着一些国企改制,很多老井停止开采,年开采量迅速减小到  $100 \text{万 m}^3$  以内,从 1990 年-2004 年,铁岭组地层年开采量从  $205.11 \text{万 m}^3$  直降到  $48.04 \text{万 m}^3$ ,随之而来的是铁岭组地层的最大弹性形变量从  $0.0223 \text{mm/a}$  减小到  $0.0052 \text{mm/a}$ ;2004 年之后年开采量一直降低,2005 年-2008 年年开采量更是小于回灌量,净开采量出现了负值,地层得到一定的回弹(图 8)。

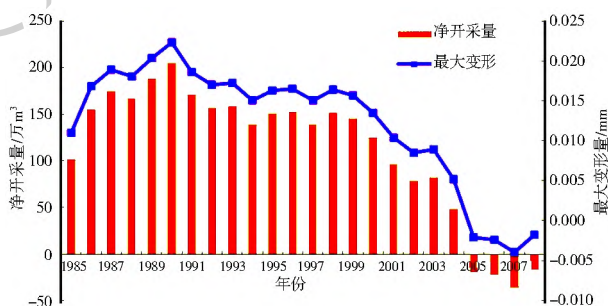


图 8 小汤山铁岭组净开采量与地层最大变形量关系

Fig. 8 Relationship between geothermal water exploitation and maximum deformation of Tieling layer in Xiaotangshan

从 1974 年截至 2010 年,小汤山地区地热田总净开采量约  $9400 \text{万 m}^3$ ,用简化模型计算得在此期间由于地热水的开采所造成的地面沉降量的贡献约为  $1.02 \text{cm}$ ;小汤山地区岩溶水年均开采  $3000 \text{万 m}^3$ ,年均形变量约  $0.32 \text{cm/a}$ 。

后沙峪地区目前没有确切的开采量数据,只能通过估算获得近似值。1961 年-2011 年全北京平原区第四系地下水贮存损失量为  $104.3 \text{亿 m}^3$ ,平原区面积  $6400 \text{km}^2$ ,后沙峪面积  $240 \text{km}^2$ ,为平原区面积的  $1/29$ ;后沙峪凹陷宽  $11000 \text{m}$ ,半径  $5500 \text{m}$ ,由此可估算出后沙峪地区 1961 年-2011 年由于第四系地下水的开采造成的基岩形变量总量约为  $1.09 \text{cm}$ 。

从计算结果看来,开采量较小的地热水造成的地面沉降量远远小于开采量较大的岩溶水造成的地面沉降。本文使用简化模型实际上是计算基岩的形变,即由于地热水的开采使得荷载(重力)变化引起的形变;InSAR 和水准获取的测量结果都为地表总的形变量,是不同形变驱动因素累积形变之和,如第四系沉积地层形变和本文计算的基岩形变。在北京,抽水引起第四系沉积地层形变继而诱发地面沉降是主因,但是沉降的产生还有其它驱动力。其它驱动力类型,所占沉降贡献多少,即是本文的研究目的。此外,局部地区(地块)的微震,除了受区域构应力影响外,地下水开采也是引起微震的一个重要因素。

特别需要指出的是,深层承压水的补给周期相对浅层地下水而言更长,有些甚至很难得到恢复,研究区深层承压水水头持续下降的趋势难以逆转,尤其是在北京水资源现状条件下,深层承压水超采现象短期内难以得到根本改变。根据研究区附近的天津地面沉降监测站的分层监测资料显示,深部地层压缩量占地面沉降的比例越来越大,这种现象与深层承压水的过度开采且不易恢复密切相关。深层承压水水头的大幅下降使得深部地层以较快的速

度持续压缩,这种压缩基本是不可逆转的,且通常情况下由于土层变形的塑性和蠕变性,即使深层承压水水头停止下降,深部土层的压缩还会持续相当长的时间。

## 4 结论和建议

### 4.1 结论

论文在收集整理以往研究资料和成果报告的基础上,结合地下水监测与地面沉降监测的实际情况,通过调查研究区(小汤山地区和后沙峪地区)基岩水的开发利用现状、收集整理开采条件下地下水水位相应特征资料,重点分析由于基岩水的开发可能导致的形变贡献,得出以下结论。

(1) 由于工作区地下水的开发利用,导致了地下水位逐年下降,相应地下水水位变化引起地层的弹性变形。

(2) 运用简化的弹性模型评估基岩水开采造成的弹性变形量,选取小汤山地热田为典型研究区,评估结果表明从1974年截至2010年,小汤山地区地热田总净开采量约9 400万 $\text{m}^3$ ,计算得引起的地面弹性变形量约为1.02 cm;小汤山地区岩溶水年均开采3 000万 $\text{m}^3$ ,年均形变量约0.32 cm。

(3) 后沙峪地区通过估算获得近似值。1961年—2011年期间由于第四系地下水的开采造成的基岩变形量约为1.09 cm。

### 4.2 建议

(1) 针对岩溶水开发利用基础工作薄弱、盲目开采等问题,北京市积极布置了全面的、系统的岩溶水勘查。该项勘查的顺利完成,不仅为保护岩溶水制定一系列的监测和保护措施,也能够进一步发挥岩溶水的供水潜力,将优质的岩溶水开采出来作为饮用水源。由于岩溶水主要埋藏在岩层中,注意采取适当的措施后,其开采基本不会引发新的地面沉降问题。

(2) 北京市目前回灌井远远低于生产井的数量。为合理利用资源,应持续推行开采-回灌制度,确保资源的可持续利用。

### 参考文献(References):

[1] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(2): 182-185.

[2] Wu J C, Shi X Q, Ye S J, et al. Numerical simulation of land subsidence induced by groundwater overexploitation in Sir Xi Chang area, China[J]. Environmental Geology, 2009, 57(6):

1409-1421.

[3] Terzaghi K, Peck R B. Soil mechanics in engineering practice [M]. New York: John Wiley and Sons, 1967.

[4] 吴建国, 张玉贞. 北京市顺义区后沙峪镇金泰花园别墅地热地质条件分析[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(2): 69-71. (WU Jianguo, ZHANG Yuzhen. Analysis of geotherm geological condition in Jintai garden villa, Houshayu township, Shunyi district, Beijing[J]. Coal Geology of China, 2007, 19(2): 69-71. (in Chinese))

[5] Sun Y. Conceptual model and potential assessment for the Xiaotangshan geothermal field, Beijing, China [J]. Geothermal Training Program, 2005: 373-396.

[6] Zhang Y Q, Gong H L. InSAR analysis of land subsidence caused by groundwater exploitation in Changping, Beijing, China [J]. International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2008.

[7] 龚士良. 上海地面沉降层次分析法研究[J]. 系统工程, 1996, 14(3): 30-34. (GONG Shirong. A study on Shanghai land subsidence by the analytic hierarchy process[J]. Systems Engineering, 1996, 14(3): 30-34. (in Chinese))

[8] 北京市地质矿产勘查开发局, 北京市地热研究院. 北京地热 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2010. (Beijing Geology Prospecting & Developing Bureau, Beijing Geothermal Research Institute. Beijing geothermal energy [M]. Beijing: China Land Press, 2010. (in Chinese))

[9] 北京市水文地质工程地质大队. 北京地下水 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. (Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology. Beijing groundwater [M]. Beijing: China Land Press, 2008. (in Chinese))

[10] 刘成龙, 车用太, 吕金波, 等. 京北地热田开发对地下流体动态的影响[J]. 地震地质, 2006, 28(1): 142-149. (LIU Chenglong, CHE Yongtai, LYU Jinbo, et al. Influence of Jingbei geothermal field exploitation on subsurface fluid behaviors [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(1): 142-149. (in Chinese))

[11] 柯柏林. 北京市平原区北部孙河断裂的地热地质特征 [J]. 现代地质, 2009, 23(16): 43-48. (KE Bailin. Geothermal and geological features of Sunhe fault in the northern part of Beijing plain [J]. Geoscience, 2009, 23(16): 43-48. (in Chinese))

[12] 柯柏林. 北京城区地热田西北部地热地质特征 [J]. 现代地质, 2009, 23(1): 49-56. (KE Bailin. Characteristics of geothermal geology in the northwestern part of the urban Beijing geothermal field [J]. Geoscience, 2009, 23(1): 49-56. (in Chinese))

[13] 孙颖, 刘久荣, 韩征, 等. 北京市地热资源开发利用状况 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(16): 7564-7566. (SUN Ying, LIU Jiurong, HAN Zheng, et al. Exploration and utilization status of geothermal resources in Beijing city [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(16): 7564-7566. (in Chinese))

[14] 朱加蓝. 北京市小汤山地区基岩热储数值模拟研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. (ZHU Jialan. Numerical modeling of the bedrock geothermal reservoir in the Xiaotangshan area of Beijing, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2014. (in Chinese))

(下转第176页)

- dissipation in nappe flow on stepped spillways [J]. *Journal of Hydrodynamics A*, 2004, 19(1): 114-119. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2004.01.019
- [12] 彭勇, 张建民, 许唯临, 等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气水深及消能率的计算[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 63-68. (PENG Yong, ZHANG Jianmin, XU Weilin, et al. Calculation of aerated water depth and energy dissipation rate of a pre-aerator stepped spillway [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 63-68. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2009.01.010
- [13] 黄智敏, 钟勇明, 朱红华, 等. 阶梯消能技术在广东省水利工程中的研究与应用[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(1): 146-150. (HUANG Zhimin, ZHONG Yongming, ZHU Honghua, et al. Research and application of technology of stepped energy dissipators in the hydraulic projects of Guangdong province [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(1): 146-150. (in Chinese))
- [14] 张秋月, 冯源, 张洛, 等. Y 型宽尾墩与阶梯溢流坝联合消能流场模拟[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(5): 93-98. (ZHANG Qiuyue, FENG Yuan, ZHANG Luo, et al. Numerical simulation on Y-shape flaring piers and stepped spillway combined with flow field [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(5): 93-98. (in Chinese))
- [15] Yasuda Y, Takahashi K, Kobayashi J, et al. The effect of aerated inflow on characteristics of hydraulic jump in a sloping channel [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 46: 601-605.
- [16] Meireles I, Matos J, Falco de M J. Pressure head and residual energy in skimming flow on steeply sloping stepped spillways [C]//In: IAHR, 31th Congress. Korea: Seoul, 2005: 2 654-2 662.
- [17] 魏文礼, 吕彬, 刘玉玲. 阶梯溢流坝和宽尾墩及消力池组合势能的水流数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2012, 27(4): 442-448. (WEI Wenli, Lyu Bin, LIU Yuling. Numerical simulation of flow on stepped spillway combined with flaring gate piers and stilling basin [J]. *Journal of Hydrodynamics A*, 2012, 27(4): 442-448. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2012.04.011
- [18] SL 155-2012, 水工(常规)模型试验规程[S]. (SL 155-2012, Test regulations for normal hydraulic model [S]. (in Chinese))
- [19] 吴智源, 张建蓉, 崔召, 等. 跌坎型底流消能工冲击区时均动水压强分布与抗冲磨强度确定[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1118-1123. (WU Zhiyuan, ZHANG Jianrong, CUI Zhao, et al. Distribution of time averaged dynamic water pressure and abrasion resistance in the impact zone of bottom flow dissipation with step down floor [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(6): 1118-1123. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.021
- [20] 陆杨, 刘焕芳, 金瑾, 等. T 形墩消力池消能率的计算及优化设计试验[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(6): 42-45. (LU Yang, LIU Huanfang, JIN Jin, et al. Study on calculation of energy dissipation ratio and optimal design test of stilling basin with T-shape baffle [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(6): 42-45. (in Chinese) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2012.06.011
- [21] Ohtsu I, Yasuda Y, Takahashi M. Discussion of onset of skimming flow on stepped spillways [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 127(6): 522-524.

(上接第 125 页)

- [15] 王泽龙. 北京市小汤山地区地温场特征及地下热水成因模式分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. (WANG Zelong. Numerical characteristics of the geothermal field and formation of the thermal groundwater in the Xiaotangshan area of Beijing, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2014. (in Chinese))
- [16] Holzer T L. Elastic expansion of the lithosphere caused by groundwater depletion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(89): 4689-4698.
- [17] Timoshenko S, Goodier J N. *Theory of elasticity* [M]. New York: McGraw-Hill, 1951.
- [18] Birch F S. Compressibility elastic constants in hand book of physical constants [M]. Colorado: Geological Society of America, 1966.
- [19] Gutenberg B. *Internal constitution of the Earth* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1951.