

doi: 10.12029/gc20210103

马峰, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张汉雄, 孙占学. 2021. 古潜山热储开发对地面沉降的影响机制研究[J]. 中国地质, 48(1): 40–51.

Ma Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Sun Zhanxue. 2021. Influence mechanism of ancient buried hill geothermal development on land subsidence[J]. *Geology in China*, 48(1):40–51(in Chinese with English abstract).

## 古潜山热储开发对地面沉降的影响机制研究

马峰<sup>1,2,3</sup>, 王贵玲<sup>1,2</sup>, 张薇<sup>1,2</sup>, 朱喜<sup>1,2</sup>, 张汉雄<sup>1,2</sup>, 孙占学<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 东华理工大学, 江西 南昌 330000)

**摘要:**古潜山是中国水热型地热的主要富集区,具有分布广、潜力大、开发利用条件好等特点,同时也是中国地面沉降相对严重的地区。廓清古潜山区地面沉降的影响机制是区域地下水资源以及地热资源的合理规划与开发利用的基础。本文从地面沉降的机理出发,以雄安新区为例,从第四系厚度、黏性土含量、水位变化、土体固结性、地下水的越流补给以及地下水开采量 6 个方面分析了对地面沉降的影响,认为雄安新区地面沉降的发生主要受第四纪地层中地下水的超采和砂岩热储的采灌不均衡两个因素的影响,其中地下水超采是地面沉降的主要因素,砂岩热储层的无序开发是诱发地面沉降的次要因素,碳酸盐岩热储的开发尽管会造成热储压力的下降,但受碳酸盐岩压缩性能的影响储层不会产生明显的压缩变形。研究结果可以为新区地面沉降的防治及能源规划提供支撑。

**关键词:**古潜山热储;地面沉降;压缩固结;城市地质调查工程;雄安新区;河北省

中图分类号:P642.26 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)01-0040-12

## Influence mechanism of ancient buried hill geothermal development on land subsidence

MA Feng<sup>1,2,3</sup>, WANG Guiling<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, ZHU Xi<sup>1,2</sup>, ZHANG Hanxiong<sup>1,2</sup>, SUN Zhanxue<sup>4</sup>

(1. *The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061, Hebei, China*; 2. *Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, 050061*, 3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 4. *East China University of Technology, Jiangxi, 330000, Nanchang, China*)

**Abstract:** Ancient buried hill is a main rich area of hydro-geothermal in China, which has the characteristics of wide distribution, great potential and good development and utilization conditions, and it is also the area with relatively serious land subsidence. Therefore, clarifying the influence mechanism of ground subsidence in the buried hill area is the basis for the reasonable planning, development and utilization of regional groundwater resources and geothermal resources. Based on the mechanism of land

收稿日期:2019-04-15; 改回日期:2020-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41602271、41741018)、中国地质调查局项目(DD20189112)、国家重点研发项目(2019YFB1504101)及自然资源部储量评估中心项目(CB2017-4-5)联合资助。

作者简介:马峰,男,1983年生,硕士,高级工程师,从事地热资源勘查评价研究;E-mail:mf-1203@163.com。

通讯作者:王贵玲,男,1964年生,研究员,博士生导师,长期从事地热资源评价、深部地热探测开发方面的研究;E-mail:guilingw@163.com。

subsidence, with Xiong'an district as an example, combined with analysis on the Quaternary thickness, clayey soil content, water level change, soil consolidation, groundwater recharge and its withdrawal, the influence on land subsidence by development of geothermal was studied, which indicates that the occurrence of land subsidence in Xiong'an new area is mainly affected by two factors: over-extraction of groundwater in Quaternary and unbalance of sandstone thermal reservoir. Among them, the overexploitation of groundwater is the main factor of land subsidence and the disordered development of sandstone thermal reservoir is the secondary one. Although the development of carbonate reservoir will cause the decrease of reservoir pressure, the reservoir will not produce obvious compression deformation under the influence of the compression performance of carbonate. As a result, the research can provide support for land subsidence prevention and energy planning in Xiong'an new area.

**Key words:** ancient buried hill therma; land subsidence; compression consolidation; urban geological survey project; Xiong'an new area; Hebei Province

**About the first author:** MA Feng, male, born in 1983, senior engineer, engaged in geothermal resource exploration and evaluation research; E-mail: mf-1203@163.com.

**About the corresponding author:** WANG Guiling, male, born in 1964, researcher, supervisor of doctor candidate, engaged in the research of evaluation, exploration and development of geothermal resources; E-mail: guilingw@163.com.

**Fond support:** Supported by National Natural Science Foundation of China(No.41602271, No.41741018), National Key R & D Project (No.2019YFB1504101) and Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China Reserve Evaluation Center Project (No.CB2017-4-5).

## 1 引言

地热是清洁、稳定、安全、高效的可再生能源。中国中低温水热型地热资源广泛分布,地热开发利用历史悠久(马峰等,2015)。大规模的地热开发利用始于20世纪70年代,主要以地热供暖、洗浴、发电、养殖和工业利用等方式为主,目前中国已成为全球地热直接利用量最大的国家(王贵玲等,2017; Wang Guilin et al.,2018)。近年来,随着中国节能减排清洁发展战略的提出,地热资源的勘探开发呈现出前所未有的发展局面。地热资源开发的环境问题也逐步表现出来,主要包括空气污染、化学污染、热污染、地面沉降和地震(申建梅,1998;马峰等,2019)。其中,地面地热开发尤其是深层地热资源的大规模开发是否会引发地面沉降的问题长期以来受到了科研以及政府工作者的关注。目前,中国有报道的地热资源开发诱发地面沉降问题主要集中在华北平原、关中平原以及东南沿海的部分地区,而这些地区也均是浅层地下水大规模开采的人口聚集区(马震等,2017),因此,深层地热开采过程中是否会引发地面沉降问题,如果存在,其所占的比例有多大亟待我们去探知。

中国的地面沉降是在经济快速发展过程中,过量开发利用地下水产生的环境地质问题。地面沉

降是制约一个地区经济可持续发展的重要因素之一,地面沉降的主要原因是过量开采地下水(杨勇等,2013)。此外,部分地区的地面沉降还与石油开采(大庆)、地热利用(西藏羊八井)、城市高层建筑(上海)、地壳构造活动(西安)(吴富春等,2002)、欠固结土层的自然压密(天津)等有关。即使在这些地区,地面沉降主要还是由过量开采地下水引起的,西安、天津和上海就是最好的例子(薛禹群等,2003)。已有研究表明,关中地区多年的地热开采而形成了热水水位降落漏斗和地面沉降的发生具有一定的相关性,目前西安开发的主要有4个热储层,热储以正常固结的砂岩泥岩储层为主,分层监测结果表明深层地热开发引起的沉降量相对浅层水开发而言明显偏小。

中国天津市根据市区沉降测量表明,地面沉降主要由于浅部含水层开采以及明化镇组地热开发所致,天津地面沉降明显的塘沽区地热开发主要集中在明化镇组和馆陶组松散岩类孔隙水。明化镇组地热开发引发地面年均沉降量8.52 mm,占总沉降量的20.2%(李红等,2016),其中开采300 m深度以下地下水对地面沉降影响约占总沉降量的35%~50%。

黄河三角洲地区地热开发以2000 m以浅的孔隙-裂隙型砂岩热储和碳酸盐岩热储为主,地面沉

降以地层(土体)自然固结与地面建筑物载荷有关,地热开发对地面沉降影响微小且集中在浅部砂岩热储层,过量开采浅层地下水是引起地面沉降的主要原因(胡彩萍等,2017)。

古潜山热储是华北地区主要的地热资源,具有多年的开发利用历史。地热资源具有温度较高、储量大、埋藏浅、易回灌、水质优的特点,适合区域集中供暖(王贵玲等,2017;吴爱民等,2018;张薇等,2019)。古潜山是形成于太古宙的碳酸盐岩,成岩作用好,压缩变形系数低,通常为区域的沉积基底,以往的地面沉降研究没有涉及此地层,随着雄安新区的成立以及地热的大规模开发,古潜山地热的开发是否会诱发地面沉降逐步受到人们的关注。有必要从地面沉降发生机理探讨古潜山地热开发诱发地面沉降的可能性。

## 2 地面沉降机理

地面沉降在人类工程经济活动影响下,由于地下松散地层固结压缩,导致地壳表面标高降低的一种地质现象。固结压缩是地面沉降发生的内在机制,压固作用的强度取决于沉积物的类型及其埋藏深度。如泥质沉积物受压固作用的影响最大,新鲜软泥的孔隙度可达90%以上,但其压缩固结成页岩后,则孔隙度不足20%。砂岩和碳酸盐沉积物受压固作用的影响则较小(孙刚臣等,2008)。

土体的固结压缩过程不仅表现在孔隙度的减小,也体现在土体中水的释出,因此也称作渗流固结。水从土体孔隙中排出的过程伴随着孔隙水压力消散和有效应力增加,有效应力是作用于土体骨架上引发土体变形的作用力,因此,土体释水越多有效应力越大,所产生的变形也就越明显。

目前普遍认为地面沉降主要是由于深层黏性土的压密释水造成,但具体的沉降机理以及沉降层的精确刻画受沉降基岩标监测数据的限制并不清晰。黏土矿物颗粒表面通常被薄层的强结合水和厚层的弱结合水所包围,除此之外,还有其他类型的孔隙水,如毛细水、重力水。重力水分布在土颗粒最外面,几乎为自由液态水,基本上与黏粒无连接,当存在很小的水头差时,水就通过土体的重力孔隙而逐渐发生渗流。饱和黏土孔隙水渗流规律是在不同水力梯度作用下重力水、毛细水、弱结合

水共同作用的结果。饱和黏土是由土体颗粒和水组成的二相体系,土颗粒变形和水的变形很小,可以忽略不计。因此,黏土压缩固结主要是土体孔隙水排出及孔隙压缩变形的结果。从土粒排列情况的变化分析,土体受力变形的过程大体(图1)为土粒的挤紧、土粒弯曲及土粒连接形状的扭曲、土粒间错动。

## 3 雄安新区地面沉降影响因素

雄安新区建设为国家大事,千年大计。已有研究表明地面沉降和地裂缝为雄安新区主要的地质灾害。雄安新区位于典型的古潜山地区,三级构造属于冀中拗陷,四级构造单元包括了廊固凹陷、牛驼镇凸起、保定凹陷、徐水凹陷、高阳低凸起和饶阳凹陷6个构造单元。第四系地层厚度为400~500 m,下伏新近系明化镇组、馆陶组,寒武奥陶系,蓟县系雾迷山组,蓟县系高于庄组5个主要的热储层,其中新近

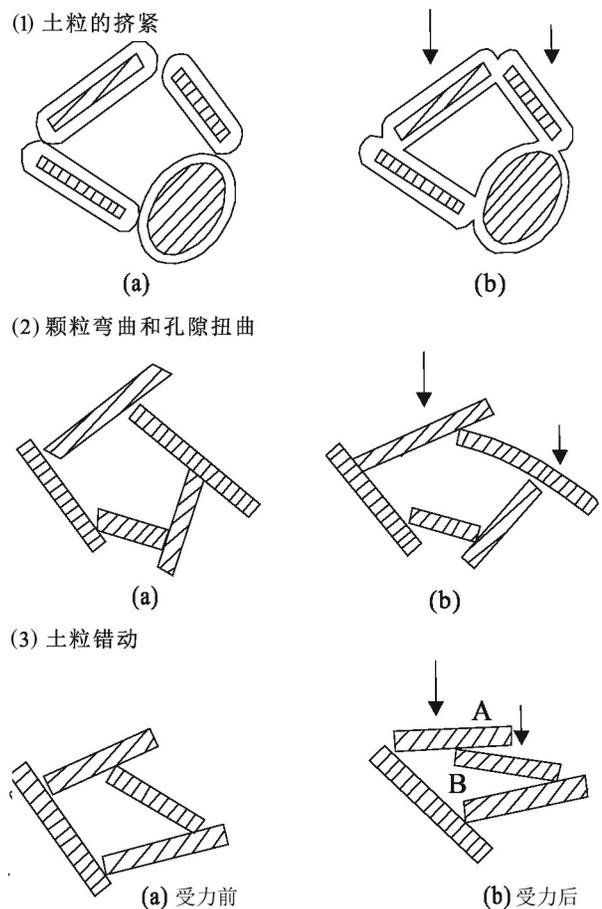


图1 土的压缩变形  
Fig.1 Compressive deformation of soil

系明化镇组、馆陶组两层为砂岩热储层,其余3个为碳酸盐岩热储层,各热储层的厚度和埋深区域变化较大。

明化镇组砂岩热储层埋深为350~450 m,相对起伏较小;全区广泛沉积,以泥岩,砂岩和含砾砂岩为主,目前为新区禁止开采的热储层。

馆陶组砂岩热储在新区西北部缺失,其他地方均有分布。馆陶组地层顶界埋深一般为1200~1600 m,地层厚度为200~893 m。岩性以砂岩、砂砾岩为主,呈微固结和半固结。

寒武奥陶系碳酸盐岩热储主要呈条带状分布在容城县城、安新县城西部地区和雄县的东北部,热储层主要为奥陶系的马家沟组、亮甲山组、冶里组及寒武系的固山组、馒头组、府君山组,主要岩性为灰岩、白云质灰岩、鲕状灰岩。

雾迷山组碳酸盐岩热储广泛分布,多揭露于容城凸起、牛驼镇凸起和高阳低凸起上,呈北东向连续分布。岩性主要为白云岩、燧石条带白云岩、泥质白云岩等,岩溶裂隙发育,连通性好。凸起区埋深800~1100 m。

高于庄组碳酸盐岩热储广泛分布在雾迷山组之下,深度超过2000 m,岩性为白云岩,含燧石团块,目前全区范围内并没有开发。

已有研究表明深层砂岩热储层地热水的大规模开发是诱发地面沉降的主要因素。天津塘沽地区地面沉降就是典型案例。塘沽区多年开发的地热水为2000 m以浅的砂岩孔隙型地热水,包括900~1400 m的明化镇组和1600~2200 m的馆陶组,地热水开发引发的沉降量约占到整个沉降量的30%,其余沉降量主要为400 m以浅的地层沉积变形为主。地面沉降量与深层地热水开采量之间具有明显的线性相关关系(林黎等,2006)。

雄安新区地下水的开采主要集中在浅部的第四纪地层以及雾迷山组主要的热储层。以下详细讨论引发地面沉降的影响因素。

### 3.1 第四系厚度

第四系是地面沉降发生主要的物质基础(何庆成等,2006)。华北平原第四系堆积物厚度大,由冲积、洪积、湖积和海积、风积及冰水和火山堆积等形成,其厚度在山麓前缘平原地带为200~300 m,广大低平原区为350~500 m,厚者达到550~600 m;

其岩性构成主要为黏土、亚黏土、砂土、亚砂土及其互层。目前,中国地面沉降发生比较严重的几个盆地地区均为第四系厚度相对较大的地区,渤海湾地区第四系厚度280~410 m(李红等,2016),西安第四系厚度大914~1095 m,上海第四系覆盖层厚度超过了400 m,北京第四系厚度为600~1000 m(蔡向民,2009)。通常来讲,第四系厚度越大,地下水超采越严重,地面沉降越严重。

### 3.2 黏性土含量

砂土在深层地下水资源开采中失水压缩可以回弹,而黏土在深层地下水开发中的释水压缩是永久性的。在河北平原产生地面沉降比较严重的沉降中心,第四系黏土厚度和主要开采段的黏土厚度均较大,(图2,表1)。沧县是河北平原典型的地面沉降区,在主要开采段黏土厚度为214.42 m,亚黏土厚度131.41 m,主要开采段200~400 m的黏土厚度179.01 m,亚黏土厚度64.80 m。

土体中黏土矿物含量越高,土体的压缩性越强。土体压缩变形是通过颗粒产生滑移和孔隙体积减小发生的,黏土矿物、碎屑矿物及其他物质成分很少发生变化。雄安新区黏性土以絮凝结构为主,结构疏松,孔隙发育但连通性差,透水性小,压缩性强。土体在自重压力下或人们抽汲地下水的过程中,产生压缩变形而导致地面下沉。黏性土压缩引发的地面沉降是长期而缓慢的,主要在于泥岩中的地层变形具有惯性“动能”。

雄安新区构造凸起区主要热储层雾迷山组碳酸盐岩埋深为800~1100 m,上覆地层通常为新近

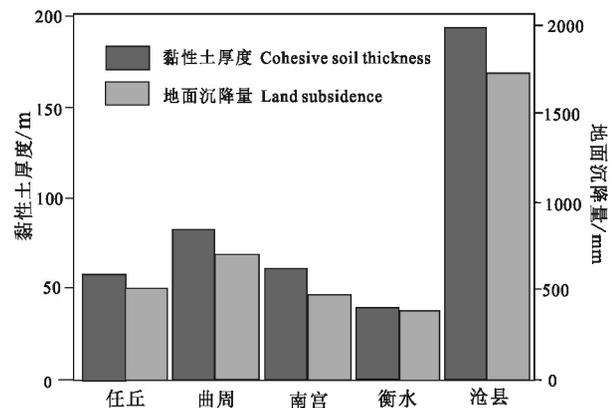


图2 地面沉降量与黏性土厚度关系图(据费宇红,2006)  
Fig.2 The relationship between land subsidence and cohesive soil thickness(after Fei Yuhong, 2006)

表1 天津不同层次热储对地面沉降的贡献

Table 1 Contribution of different geothermal layers to land subsidence in Tianjin

| 热储层  | 厚度/m     | 含水量/% | 孔隙度/% | 压缩系数/(MPa <sup>-1</sup> ) | 平均黏土含量/% | 占整个沉降量百分比/% |
|------|----------|-------|-------|---------------------------|----------|-------------|
| 第四系  | 500      | 21    | 59    | 0.016                     | 23       | 70%         |
| 明化镇组 | 800~1000 | 20    | 58    | 0.011                     | 12.7     | 10%         |
| 馆陶组  | 400~600  | 14    | 17    | 0.009                     | 8.6      | 20%         |
| 雾迷山组 | 800~1200 | 8     | 3.8   | 0.07×10 <sup>-4</sup>     | 10.4     | 未监测         |

系明化镇组砂岩层。从雄安新区凸起区钻孔来看,覆盖层平均泥质含量23.88%,而进入基岩热储层后平均泥质含量只有6.13%,平均孔隙度也由22.02%下降为2.0%。凹陷区主要热储层雾迷山组碳酸盐岩埋深为2000~4000 m,上覆地层通常为新近系明化镇组、馆陶组砂岩层,古近系东营组、沙河街组、孔店组砂砾岩夹泥岩地层。从雄安新区凹陷区钻孔测井参数分析,第四纪覆盖层平均泥质含量27.8%,新近纪地层平均泥质含量11.51%,古近纪地层平均泥质含量11.07%,而进入雾迷山组基岩热储层后平均泥质含量减小到1.98%,深部高于庄组上段平均泥质含量略有升高为3.49%。与之相对应,平均孔隙度从浅部到深层也由33.9%下降为9.84%(图3)。

泥质含量越高往往地层孔隙度大,容易产生固结压缩。碳酸盐岩热储层的泥质含量为第四纪地层的1/10,是上覆砂岩热储层的1/5,且岩体固结好,

泥质主要来自于长期水流携带的矿物沉积、碳酸盐岩中长石矿物的水热蚀变以及断裂破碎作用,黏土矿物的溶蚀运移不会对整个岩体骨架承载力产生明显影响,因此,碳酸盐岩热储层测井解译的泥质含量也不像砂土层与沉降具有明显的相关性。

从测井曲线来看(图3),雄安新区泥质含量较高的地层主要涉及到第四系松散层、新近系明化镇组热储层以及古近系砂泥岩地层。和地热开发相关的地层凸起区包括明化镇组热储层,凹陷区包括新近系明化镇组和馆陶组两个热储层。

### 3.3 地下水位变化

具备了较厚的沉积层厚度以及黏性土含量两个基本条件后,地下水的开采是目前公认的人类活动因素引发地面沉降的因素。地下水开采形成水位降落漏斗,伴随着空隙水压力下降,而岩土骨架的有效应力就会随之增大,导致可压缩变形的岩土

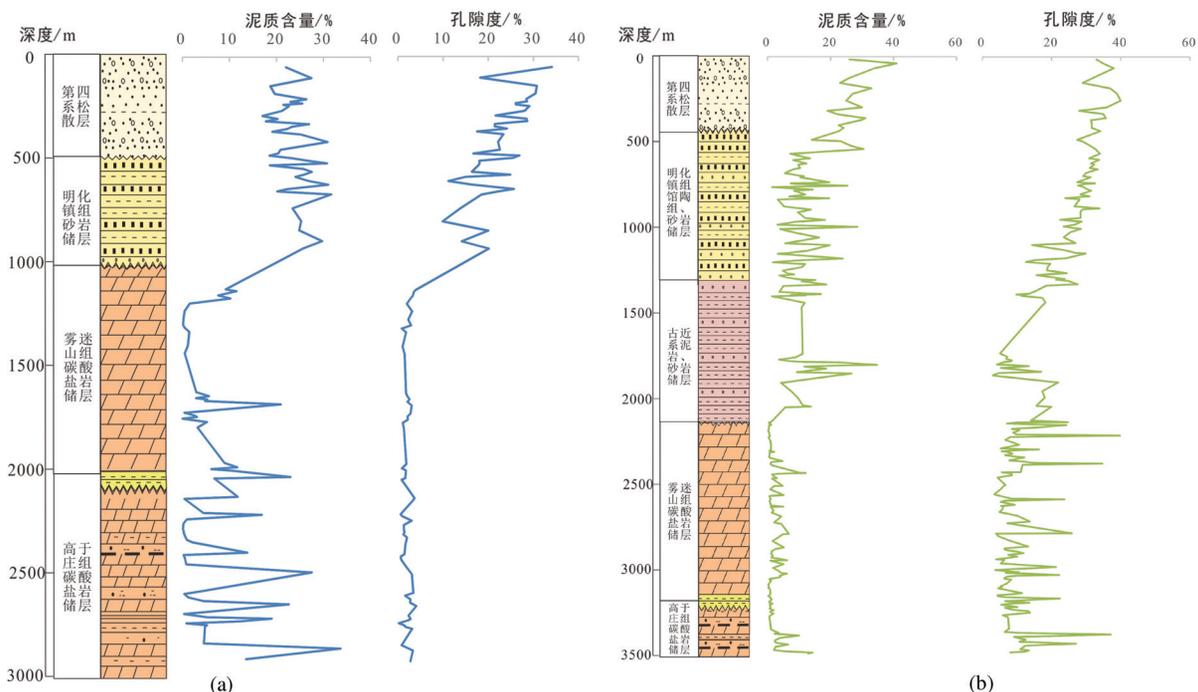


图3 雄安新区凸起区(a)与凹陷区(b)典型地热井测井解译图

Fig.3 Interpretation of typical geothermal well logging in the uplift (a) and depression (b) areas in Xiong'an New Area

体发生形变。

在抽汲地下水过程中,黏土渗流规律对地面沉降有两个方面的影响,一是黏土的渗流特性直接影响土体的压密固结速率,造成土层的差异变形沉降;二是黏土的渗流使土层之间出现渗流力,从而增加了水头差,土颗粒骨架的有效应力增大,导致土层压密变形,形成地面沉降。

近年来,随着地下水开采层位的加深,深层地下水开采所引起地面沉降相对浅层而言具有影响范围大、时间长、沉降量大的特点。山东德州抽汲300~900 m的深层明化镇组地下水,漏斗中心水位累计下降超过100 m,累计沉降量近1800 mm(赵玉麒,2016)。深层地下水开采引发地面沉降可用图4解释。在天然状态条件下(以三层为例),假设下部承压含水层中的承压水位与上部潜水含水层的水位相一致,那么图中的G-G'线将代表由土层自重所造成的总应力线(Schiffman,1958)。H-C线则代表土层中的天然孔隙水压力线。假定抽水使下部含水层的承压水头降低 $\Delta h$ 然后长期稳定,其结果就会使土层中的孔隙水压力由 $P_w^0$ 降至 $P_w^{\Delta h}$ ,而有效应力则由 $P_s^0$ 等量地增至 $P_s^{\Delta h}$ 。由于土层内的各点最终都将获得一个最大有效应力增值 $\Delta P_s = P_s^{\Delta h} - P_s^0$ ,所以黏土层中总的最大有效应力增值将等于 $\Delta ABH'$ 的面积,而砂层中总的有效应力增值则将等于平行四边形 $AH'CD$ 的面积。

上述有效应力的增大必将导致土层的固结和

压密。根据土力学的基本原理,砂层和黏土层的最终压密量将分别等于:

$$S = \frac{\gamma_w \Delta AH'CD}{E} = \frac{\gamma_w \Delta h H_{砂}}{E}$$

$$S_{\infty} = \frac{a_v}{1 + \epsilon_0} \gamma_w \Delta ABH' = \frac{a_v}{2(1 + \epsilon_0)} \gamma_w \Delta h H_{黏}$$

$S_{\infty}$ —砂土层的沉降量,mm;

$S$ —黏土层的沉降量,mm;

$\gamma_w$ —水的密度,g/cm<sup>3</sup>;

$E$ —砂土侧限压缩模量;

$\epsilon_0$ —黏性土孔隙度;

$a_v$ —土的压缩系数,MPa<sup>-1</sup>。

砂层与黏土层两者压密量之和就是地面沉降的总量。随着承压含水层中水的持续开采,承压水水头逐渐下降,孔隙水压力下降,就会造成相邻含水层对承压水的越流补给,向下和向上的渗流,使被抽汲地下水的含水层与相邻含水层之间的水头差增加,从而增加土颗粒骨架承受的有效应力,导致土层发生压密变形,这一过程也称为渗流压密。以华北平原深层地下水开发为例,深层地下水开发形成的降落漏斗与地面沉降速率具有一定的相关性。

华北平原5个典型的地面沉降区(图5),1975—2010年,大城、青县、沧州市区、冀枣衡、廊坊5个地区年平均深层地下水下降速率为1.86 m/a,2000—2010年,各地平均地面沉降速率为48.2 mm/a。深层地下水的开采形成水位降落漏斗是诱发地面沉

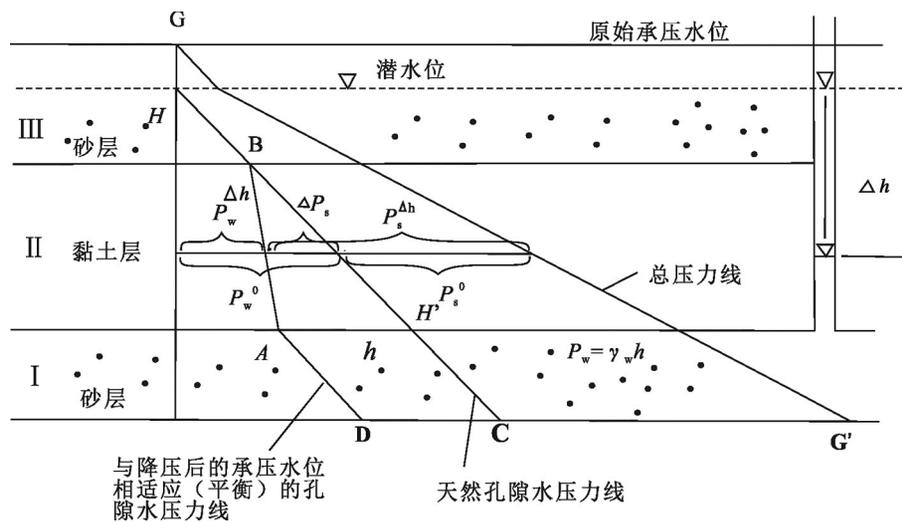


图4 三层结构条件下单层抽水引起的有效应力和孔隙水压力的变化

Fig.4 Changes of effective stress and pore water pressure caused by single aquifer pumping under the condition of three layer structure

降的主要因素。可以看出(表2),地面沉降的速率与地下水下降速率呈现正相关关系,沧州地下水年降幅为1.39 m/a,地面沉降速率为32 mm/a,低于其他4个沉降区,大城县地下水下降与地面沉降速率均为最大。从时间上来看,深层地下水开采对地面沉降的影响是滞后的。

雄安新区第四系分为4个含水层组。根据含水层水文地质和开发利用条件,浅层地下水可分为潜水和浅层承压水,含水层岩性主要以中、细、粉、粉细砂为主。含水层厚度一般小于40 m,底界深度一般150~180 m,多年浅层地下水水位埋深在0~40 m。靠近白洋淀地下水水位变浅,雄县东北部以及安新县南部地下水水位埋深大,最深达到40~60 m。浅层地下水与地表河流循环交替频繁。深层地下水为承压水,含水层岩性主要以粗、中、细砂为主,含水层厚度一般在100~180 m,底板深度一般在350~600 m。深层地下水主要接受侧向径流补给,垂向补给较少。排泄方式以人工开采为主,其次是向下游径流排泄。深层地下水以及浅部砂岩热储层的开发所形成的地下水降落漏斗更为明显。从图6中可以看出,容城、雄县、安新浅层地下水下降速率一致,雄县浅层地下水水位下降最大,安新县水位下降最小,雄县深层地下水水位下降速率超过浅层。而从2012—2017年雄安新区地面沉降监测数据来看,雄县龙湾镇最大为28 mm/a,容城县城为22 mm/a,安新县<10 mm/a。

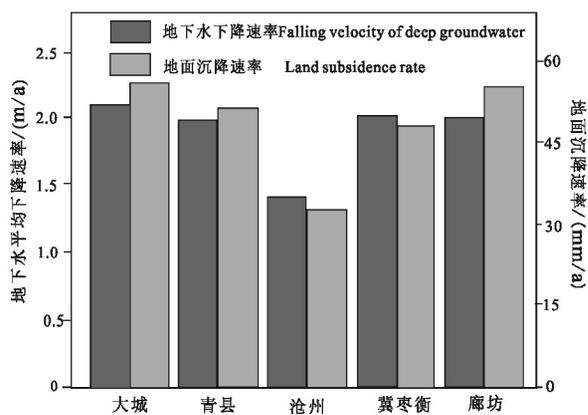


图5 华北典型地面沉降区深层地下水下降速度与地面沉降速度对比图

Fig.5 Comparison of the falling velocity of deep groundwater with the land subsidence rate in a typical land subsidence area in North China

### 3.4 土体固结性

饱和或非饱和土体,在固结的过程中,土体积的改变只依赖于土中的有效应力,基本上与时间无关。土在地质历史上曾经受过的最大压力(指有效应力)称为先期固结压力 $P_c$ (预固结压力),如土层目前承受的上覆自重压力 $P_s$ 等于 $P_c$ ,这种土称为正常固结土;如果 $P_c$ 大于 $P_s$ ,则称为超固结土。如果 $P_c$ 小于 $P_s$ ,则称为欠固结土。通过对华北地区浅层土体进行室内高压固结试验可知,区域110 m以浅为正常固结土层,110~255 m为超固结土层,255~408 m为欠固结土层(表3)。正常固结和欠固结土层都具有产生较大的压缩变形的潜力,是地面沉降发生的主要层段。

华北地区碳酸盐岩为中元古代,距今已有10几亿年,成岩固结好,岩石抗压缩变形的能力强。从压缩系数来看,碳酸盐岩的压缩系数为 $0.03 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ ,为砂岩的二分之一,与浅层的黏性土层相比,仅为其压缩系数的十万分之一,因此,在相同的压力条件下碳酸盐岩的固结压缩变形相对于浅部的第四系土层而言是可以忽略的。

### 3.5 地下水的越流补给

尽管目前没有深层碳酸盐岩热储开发诱发地面沉降的直接证据,但是,由于碳酸盐岩热储的开发,造成相邻砂岩热储层的越流补给,同样可能引发砂岩热储层地面沉降的产生。水化学特征分析是判断深层与浅层的水力联系的有效方法。地下水循环条件的变化必然伴随着水质的变化,而水质的变化是水循环和地温变化的结果(张保建等,2015)。由于开采深层地下水而引发浅层地下水越流补给,浅层地下水所处的含水层由于地层松软,通常为欠固结土,水位的下降会形成地面沉降。从表4中可以看出,雄安新区浅层地下水与浅部第一热储层明化镇组砂岩储层水质类似,矿化度小于1 g/L,为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水,而深部碳酸盐岩热储层水质明显不同,矿化度普遍大于3 g/L,为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水。

从地质构造分析,雄安新区处于冀中凹陷中部,西部为太行山隆起,东部为沧县隆起,浅部地下水交替强烈,第四系与明化镇组砂岩储层在接受大气降水补给后顺层流动,在次级断裂的作用下,地下水垂向运动;而深部雾迷山组热储层在山区接受补给后随着隐伏岩溶的发育,逐步向深部运移,温

表2 华北平原典型沉降区地下水位动态与平均地面沉降速率(据郭海朋等,2017)

Table 2 Groundwater level dynamics and average land subsidence rate in typical subsidence areas of North China Plain(after Guo Haipeng et al., 2017)

| 年份            | 水位埋深/m |      |       |       |      |
|---------------|--------|------|-------|-------|------|
|               | 大城     | 青县   | 沧州    | 冀枣衡   | 廊坊   |
| 1975          | 18.6   | 19.4 | 50.1  | 32.8  | 8.9  |
| 1980          | 33.2   | 40.7 | 69.7  | 50.0  | 30.1 |
| 1985          | 52.7   | 63.4 | 74.8  | 55.9  | 44.9 |
| 1990          | 55.4   | 67.5 | 81.8  | 56.5  | 61.1 |
| 1995          | 62.9   | 76.9 | 90.4  | 76.1  | 68.6 |
| 2000          | 83.7   | 87.6 | 95.1  | 100.8 | 78.2 |
| 2005          | 92.8   | 80.1 | 101.1 | 101.4 | 63.8 |
| 2010          | 64.0   | 86.0 | 98.9  | 92.3  | 76.6 |
| 水位平均降速/(m/a)  | 2.12   | 1.90 | 1.39  | 1.96  | 1.93 |
| 地面沉降速率/(mm/a) | 55     | 51   | 32    | 47    | 54   |

度随之升高,水岩作用加强,地下水矿化度逐渐增大,在部分构造封闭的地区矿化度形成异常高值。由于碳酸盐岩储层与浅部砂岩热储层垂向深度差异大,地下水的开放性随着深度的增大逐渐减弱,由半开放型转变为半封闭型,因此,两层之间通常不会发生水力联系。水化学资料显示,仅在次级构造活动地带,存在深部热储水向浅部越流补给的情况,砂岩热储层垂直向下补给并没有发现。新区南部高阳地热田馆陶组热储地下水矿化度达到2.7 g/L也说明了区域明化镇组砂岩热储以下地下水交替作用微弱,因此,开采深部热储地热水引发浅部含水层越流补给的可能性很小,且在回灌条件下由于地热水开采引发热储压力的下降也是很微弱的,地下水由浅部向深部补给的水动力条件不佳。华北东

部平原区地下水垂向循环规律氢氧同位素分析(师永霞等,2010)表明华北地区含水层具有分带性,垂向渗流补给主要发生在350 m以浅的第Ⅰ、第Ⅱ和第Ⅲ含水层,第Ⅰ含水层接受大气降水补给为现代水,第Ⅱ和第Ⅲ含水层为现代水与古水混合水,通过垂向的越流补给,水力联系密切;350 m以下的第Ⅳ和第Ⅴ含水层为古水,没有与其他含水层发生越流补给现象。

### 3.6 区域构造与地热开发

雄安新区范围内主要的构造断裂为容城断裂、牛东断裂、以及徐水—牛南断裂。容城断裂北部与大兴断裂连接,断至结晶基底,是控制新近系发育的生长性断裂。徐水—牛南断裂延东西向展布,断开了结晶基底,为长期活动深大断裂。牛东断裂位于雄县东侧,是控制牛驼镇凸起与霸县凹陷的正向大断裂,为断开了基底的深大断裂。断裂切割深度大,活动时间长,这些断裂在进入新近纪以后除牛东断裂以外均已停止活动,且牛东断裂的活动性也明显减弱(何登发等,2018)。从区域地面沉降与构造活动发育的图上来看,雄安新区地面沉降区主要集中在雄县北部,雄州镇—大营镇—北沙口一线,年沉降速率达到40~70 mm/a,最大沉降速率为75 mm/a,位于雄县大营镇西管村;容城县沉降主要发生在县城西北部,最大沉降速率达28 mm/a,总体沉降速率较小,不超过15 mm/a;安新县绝大部分区域没有发生地面沉降,只在南部的龙华乡形成了相对较大的地面沉降,沉降速率为20~30 mm/a(张永红等,2018)。从图7、图8中可以看出,雄安新区地面

表3 华北黏土高压固结试验结果

Table 3 The results of high pressure consolidation test of clay in North China

| 序号 | 取样深度/m      | 土体分类 | 初始孔隙比 $e_0$ | 压缩指标                      |                                 |                  |                         | 固结状态 |
|----|-------------|------|-------------|---------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------|------|
|    |             |      |             | 压缩模量 $E_{a-2}/\text{MPa}$ | 压缩系数 $a_{v1-2}/\text{MPa}^{-1}$ | 压缩回弹指数 $C_c/C_s$ | 先期固结压力 $P_c/\text{kPa}$ |      |
| 1  | 79.5~79.8   | 粉土   | 0.647       | 0.645                     | 0.202                           | 0.175            | 989.64                  | 正常固结 |
| 2  | 98.0~98.3   | 黏土   | 0.500       | 6.710                     | 0.224                           | 0.221            | 1349.5                  | 正常固结 |
| 3  | 111.5~111.8 | 粉土   | 0.436       | 7.640                     | 0.188                           | 0.140            | 1565.4                  | 正常固结 |
| 4  | 152.0~152.3 | 黏土   | 0.539       | 8.822                     | 0.174                           | 0.210            | 2328.7                  | 超固结  |
| 5  | 178.5~178.8 | 黏土   | 0.414       | 7.003                     | 0.155                           | 0.174            | 2190.5                  | 超固结  |
| 6  | 207.4~207.7 | 黏土   | 0.488       | 9.569                     | 0.155                           | 0.177            | 2504                    | 超固结  |
| 7  | 255.2~255.5 | 黏土   | 0.329       | 10.498                    | 0.127                           | 0.147            | 2866.4                  | 正常固结 |
| 8  | 278.7~279.0 | 黏土   | 0.449       | 6.989                     | 0.107                           | 0.131            | 1524.6                  | 欠固结  |
| 9  | 319.2~319.5 | 黏土   | 0.406       | 13.889                    | 0.101                           | 0.258            | 1568.4                  | 欠固结  |
| 10 | 345.7~346.0 | 粉土   | 0.528       | 12.195                    | 0.125                           | 0.310            | 1795.5                  | 欠固结  |
| 11 | 371.0~371.3 | 黏土   | 0.461       | 7.995                     | 0.095                           | 0.167            | 1093.2                  | 欠固结  |
| 12 | 408.2~408.5 | 黏土   | 0.483       | 12.976                    | 0.078                           | 0.140            | 1567.8                  | 欠固结  |

表4 雄安新区地下水及地热水水化学特征

Table 4 Chemical characteristics of groundwater and geothermal water in the Xiong'an New Area

| 项目                            | 第四系                  | 明化镇组                 | 雾迷山组碳酸                  |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
|                               | /(mg/L)              | 砂岩储层/(mg/L)          | 盐岩储层/(mg/L)             |
| pH                            | 7.82                 | 8.46                 | 7.51                    |
| Na <sup>+</sup>               | 43.4                 | 34.95                | 872.10                  |
| Ca <sup>2+</sup>              | 56.5                 | 33.54                | 59.21                   |
| Cl <sup>-</sup>               | 17.4                 | 89.07                | 1079.00                 |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 443                  | 670.40               | 707.40                  |
| F <sup>-</sup>                | 0.68                 | 8.16                 | 7.00                    |
| 偏硅酸                           | 26.97                | 48.80                | 48.31                   |
| 溶解性总固体                        | 417.3                | 335.8                | 3072.00                 |
| 水质类型                          | HCO <sub>3</sub> -Na | HCO <sub>3</sub> -Na | Cl·HCO <sub>3</sub> -Na |

沉降区与构造断裂无明显的相关关系。主要的沉降区与地热开发井的位置也有明显的偏离。目前,雄安新区地热开发利用的集中区为雄县和容城县城,均具有多年的地热开发利用历史,而这两个地区均非地面沉降中心,雄县北部碳酸盐岩热储开发分散,地面沉降量却相对严重,而雄县北部正是工业用水的集中区,地下水的开发仍是诱发该处沉降的主导因素。因此判断雄安新区碳酸盐岩热储开发与地面沉降的发生并无直接关系。

### 3.7 地下水开采量

与此同时,从总需水估算来看,雄安新区现状水平年总需水量共  $34.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中农业  $25.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、工业  $4.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、城镇生活  $1.07 \times 10^8 \text{ m}^3$  和生态环境  $1.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,缺水率为 19%,整体属缺水状态。缺水直接导致每年超采地下水总量超过  $5 \times 10^8$

$\text{m}^3$ ,地下水超采现象严重,其中最为严重的雄县已经累计超采  $6.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。自 20 世纪 80 年代以来地下水水位平均下降速率高达  $0.55 \text{ m/a}$ ;据河北省政府《关于公布平原区地下水超采区、禁采区和限采区范围的通知》,雄县、安新县大部和容城县东南部为深层一般超采区,而全境其他地区均为浅层一般超采区(夏军等,2017)。

据统计,雄安新区地热利用以供暖为主,地热供暖面积约  $740 \text{ 万 m}^2$ ,温泉洗浴和种养殖利用量较少。每年地下热水开采量约为  $2500 \text{ 万 m}^3$ ,地热水回灌量约为  $2100 \text{ 万 m}^3$ 。容城和雄县大部分地区以开采深部基岩热储地热水为主,安新以及雄县东部少量砂岩热储地热水的开发。相对于浅层和深层地下水的开采,雄安新区地热水的开采量仅为年地下水超采量的  $1/20$ 。同时,未来雄安新区的地热利用必定是采灌均衡的模式,将深层地热水作为取热介质,取热不取水,维持热储内压力平衡。

### 3.8 讨论

(1)基于上述对碳酸盐岩以及砂岩热储的沉降分析,雄安新区的地热开发应以碳酸盐岩热储开发为主,砂岩热储开发为辅,且两个储层的地热开发均应考虑采灌均衡,防止因热储压力下降而诱发地面沉降。同时严格控制开采区临界水位,以整个地热田为单元进行综合规划,合理布局采灌井,在保障区域地热清洁利用的基础上,维持热储压力平衡。

(2)加强对地面沉降的分层监测,通过建立分层基岩标,监测不同层位地面沉降的发生情况,从而有针对性地制定地面沉降的防治措施,同时明确

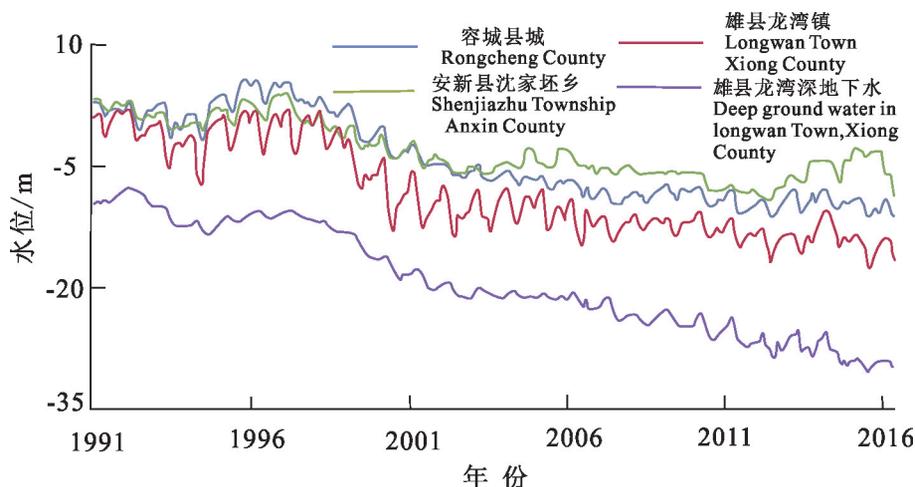


图6 雄安新区地下水动态曲线(据凤蔚等,2017)

Fig.6 Groundwater dynamic curve of the Xiong'an New Area(after Feng Wei et al., 2017)

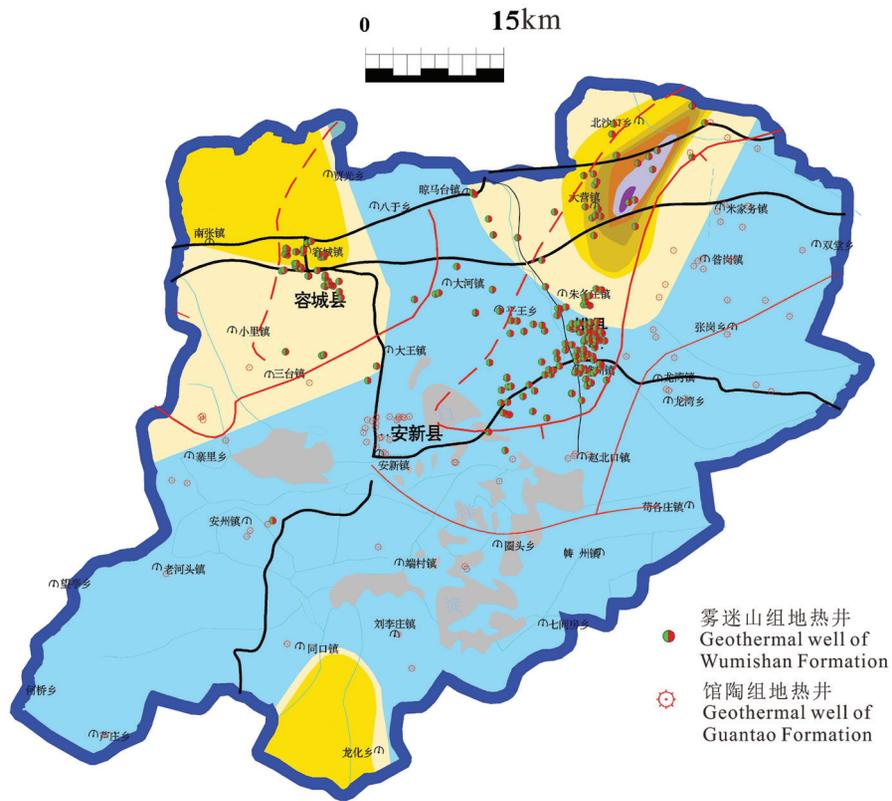


图7 雄安新区平均沉降速率  
Fig.7 Average land subsidence rate in the Xiong'an New area

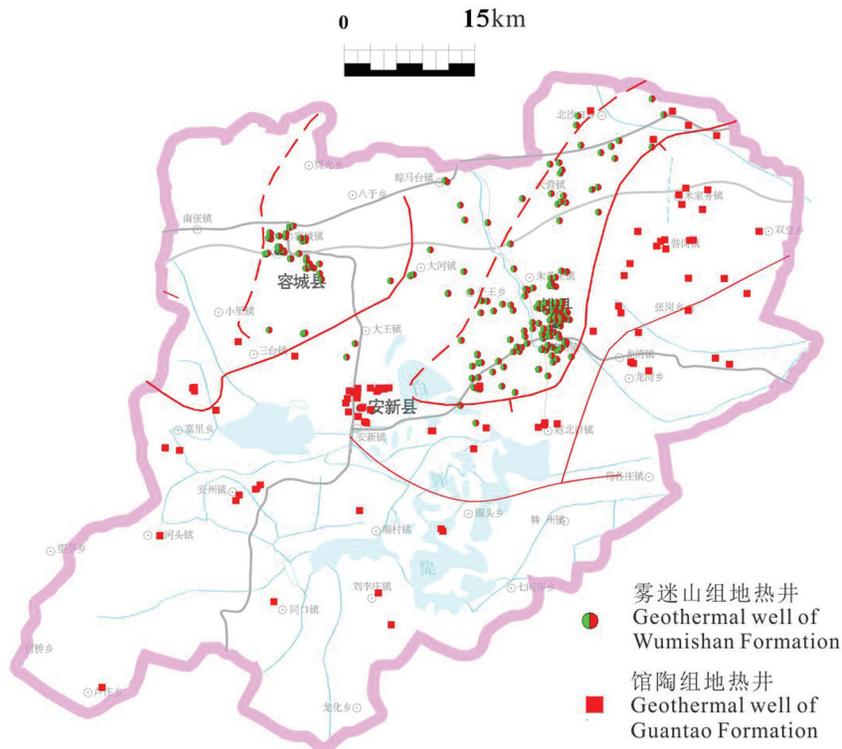


图8 雄安新区现状地热井分布图  
Fig.8 Distribution map of geothermal wells in the Xiong'an New Area

地面沉降的主要地质诱因。

## 4 结 论

(1)古潜山区地面沉降的影响因素主要包括了第四系厚度、黏性土含量、地下水位变化、土体固结性、地下水的越流补给以及地下水开采量。第四系厚度越大,黏性土含量越高,水位下降越快,所诱发的地面沉降量越大。

(2)华北地区地面沉降是由于浅层、深层地下水以及砂岩孔隙型地热水的开发造成地层有效应力增大,地层逐渐压缩固结变形而形成的。碳酸盐岩储层属于超固结地层,岩体压缩系数为上覆第四纪地层的万分之一,即使储层压力下降,地下水位下降,碳酸盐岩地层骨架所增加的应力也不足以使整个热储层造成明显的压缩变形。

(3)对比分析雄安新区的地热开发与沉降分布的关系,地面沉降的发生与深层地热的规模化开发并无直接的相关性。沉降中心的形成主要受第四系地下水超采的影响,其中地下水超采是地面沉降的主要因素,砂岩热储层的无序且没有采灌均衡的开发成为部分地区诱发沉降的次要因素。

## References

- Cai Xiangmin, Luan Yingbo, Guo Gaoxuan, Liang Yanan. 2009. 3D Quaternary geological structure of Beijing plain[J]. *Geology in China*, 36(5):1021–1029(in Chinese with English abstract).
- Fei Yuhong. 2006. Evolution and Conservation of Groundwater in Hebei Plain to the South of Beijing and Tianjin[D]. Nanjing: Hohai University(in Chinese with English abstract).
- Feng Wei, Qi Xiaofan, Li Haitao, Li Wenpeng, Yin Xiulan. 2017. Wavelet analysis between groundwater level regimes and precipitation, North Pacific Index in the Xiongan New Area[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 44(6):7–14(in Chinese with English abstract).
- Guo Haipeng, Bai Jinbin, Zhang Youquan, Wang Liya, Shi Jusong. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 44(6):1115–1127(in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Shan Shuaiqiang, Zhang Yuyin, Lu Renqi, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 1007–1022(in Chinese with English abstract).
- He Qingcheng, Liu Wenbo, Li Zhiming. 2006. Land subsidence survey and monitoring in the North China Plain[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(2):195–209(in Chinese with English abstract).
- Hu Caiping, Zhang Jingyan, Hao Mengyuan, Hu Yanzen. 2017. Impact analysis of geothermal development on land subsidence in the Yellow River Delta[J]. *Land and Resources in Shangdong Province* 33(2):42–45(in Chinese with English abstract).
- Li Hong, Xiao Guoqiang, Yang 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).
- Lin Li, Peng Jianbing, Li Dan, Ma Fengru, Li Huijuan. 2006. A study of the relationship between exploitation of geothermal water in deep-seated aquifer and subsidence[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 33(3):34–37 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xie Hailan, Lin Liangjun, Hu Qiuyun, Qian Yong, Zhang Surong, Wang Guiling, Li Jianguo, Tan Chengxuan, Guo Haipeng, Zhang Fucun, Zhao Changrong, Liu Hongwei. 2017. The environmental geological conditions of Land resources in the Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(5): 857–873(in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Wang Xiaoyuan, Wang Guiling, Lin Wenjing, Li Honglei. 2015. Analysis of the potential and development prospects of shallow geothermal energy and hot dry rock resources[J]. *Science & Technology Review*, 33(19): 49–53(in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Wang Guiling, Wei Shuaichao, Sun Zhanxue. 2019. Summary of hot research topics in geothermal exploitation in 2018[J]. *Science & Technology Review*, 37(1):134–143(in Chinese with English abstract).
- Schiffman R L. 1958. Consolidation of soil under time-dependent loading and varying permeability[J]. *Proc. Highw. Res. Bd*, 37: 584–617.
- Shen Jianmei, Chen Zongyu, Zhang Gubin. 1998. Environmental protection and environmental impact of geothermal development and utilization[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 19(4):402–408(in Chinese with English abstract).
- Shi Yongxia, Wang Guiling, Gao Yaxing. 2010. Indication of hydrochemistry and isotope for vertical circulation of groundwater in the North China Plain[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 37(4):18–23(in Chinese with English abstract).
- Sun Gangchen, Peng Jianbing, Zhang Deyuan. 2008. Discussion on the genetic mechanism of land subsidence in Xi'an[J]. *Journal of Catastrophology*, 23(9):40–44(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4):449–459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(6):1074–1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Ma Feng, Lin Wenjing, Liang Jiyun, Zhu Xi. 2018. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China[J]. *China Geology*, 2:273–285.

- Wu Aimin, Ma Feng, Wang Guiling, LiuJinxia, Hu Qiuyun, Miao Qingzhuang. 2018. A study of deep seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(5):523–532(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuchun, Fang Wei, Song Lisheng, Wang Feng, Zhu Xingguo. 2002. Analysis of the relationship among geothermal water exploitation, ground subsidence and ground fissures in Xi'an City, China[J]. *Seismology and Geology*, 24(2):234–240(in Chinese with English abstract).
- Xia Jun, Zhang Yongyong. 2017. Water resource and pollution safeguard for Xiongan New Area construction and its sustainable development[J]. *Bulletin of Chinese Academy Sciences*, 32(11):1199–1205(in Chinese with English abstract).
- Xue Yuqun, Zhang Yun, Ye Shujun, Li Qinfen. 2003. Land subsidence in China and its problems[J]. *Quaternary Sciences*, 23(6):585–593(in Chinese with English abstract).
- Zhang Baojian, Gao Zongjun, Zhang Fengyu, Hao Shuanghu, Liu Fuyi. 2015. Hydrodynamic condition and response of formation water chemical fields of geothermal water in North China Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(6):217–226(in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Zheng Fandong, Liu Licai, Dou Yanbing, Jia Sanman. 2013. Susceptibility zoning and control measures on land subsidence caused by groundwater exploitation[J]. *Geology in China*, 40(2):653–658(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 46(2): 255–268(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yonghong, Liu Bing, Wu Hongan, Cheng Xia, Kang Yonghui. 2018. Ground subsidence in Xiong'an New Area from 2012 to 2016 monitored by InSAR technique[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(5):652–662(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuqi. 2016. Research of the Ground Subsidence Disaster Caused by Groundwater Exploitation in Dezhou Regional[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- 何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构:来自反射地震资料的约束[J]. *中国科学:地球科学*, 48(9):87–102.
- 何庆成, 刘文波, 李志明. 2006. 华北平原地面沉降调查与监测[J]. *高校地质学报*, 12(2):195–209.
- 胡彩萍, 张景燕, 郝梦圆, 胡艳珍. 2017. 黄河三角洲生态区孔隙热储地热开发对地面沉降的影响分析[J]. *山东国土资源*, 32(2):42–45.
- 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.
- 林黎, 赵苏民, 李丹, 马凤如, 李会娟. 2006. 深层地热水开采与地面沉降的关系研究[J]. *水文地质工程地质*, 33(3):34–37.
- 马震, 谢海澜, 林良俊, 胡秋韵, 钱永, 张素荣, 王贵玲, 李建国, 谭成轩, 郭海朋, 张福存, 赵长荣, 刘宏伟. 2017. 京津冀地区国土资源环境地质条件分析[J]. *中国地质*, 44(5):857–873.
- 马峰, 王潇媛, 王贵玲, 蔺文静, 李洪磊. 2015. 浅层地热能与干热岩资源潜力与开发前景分析[J]. *科技导报*, 33(19): 49–53.
- 马峰, 王贵玲, 魏帅超, 孙占学. 2019. 2018 地热勘探开发热点回眸[J]. *科技导报*, 37(1):134–143.
- 申建梅, 陈宗宇, 张古彬. 1998. 地热开发利用过程中的环境效应及环境保护[J]. *地球学报*, 19(4):402–408.
- 师永霞, 王贵玲, 高业新. 2010. 华北东部平原地下水垂向循环的水化学与同位素标示[J]. *水文地质工程地质*, 37(4):18–23.
- 孙刚臣, 彭建兵, 张德媛. 2008. 西安市地面沉降成因机理中的若干问题探讨[J]. *灾害学*, 23(9):40–44.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 38(4):449–459.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 44(6): 1074–1085.
- 吴富春, 方炜, 宋立胜, 王锋, 朱兴国. 2002. 西安市地热水开采与地面沉降、地裂缝关系的分析[J]. *地震地质*, 24(2):234–240.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. *地球学报*, 39(5): 523–532.
- 夏军, 张永勇. 2017. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战[J]. *中国科学院院刊*, 32(11):1199–1205.
- 薛禹群, 张云, 叶淑君, 李勤奋. 2003. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. *第四纪研究*, 23(6):585–593.
- 杨勇, 郑凡东, 刘立才, 窦艳兵, 贾三满. 2013. 地下水开采引发的地面沉降易发性区划及控制措施[J]. *中国地质*, 40(2):653–658.
- 张保建, 高宗军, 张凤禹, 郝栓虎, 刘福义. 2015. 华北盆地地下热水的水动力条件及水化学响应[J]. *地学前缘*, 22(6):217–226.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. *中国地质*, 46(2): 255–268.
- 张永红, 刘冰, 吴宏安, 程霞, 康永辉. 2018. 雄安新区2012—2016年地面沉降InSAR监测[J]. *地球科学与环境学报*, 40(5):152–162.
- 赵玉麒. 2016. 山东德州开采地下水导致地面沉降的研究[D]. 长春: 吉林大学.

## 附中文参考文献

- 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 梁亚南. 2009. 北京平原第四系的三维结构[J]. *中国地质*, 36(5):1021–1029.
- 费宇红. 2006. 京津以南河北平原地下水演化与涵养研究[D]. 南京: 河海大学.
- 凤蔚, 祁晓凡, 李海涛, 李文鹏, 殷秀兰. 2017. 雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J]. *水文地质工程地质*, 44(6):7–14.
- 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 王丽亚, 石菊松. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. *中国地质*, 44(6):1115–1126.