

环境地质

## 层状孔隙裂隙热储最大允许水位降深研究

——以德州市城区为例

杨询昌

(山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253015)

**摘要:**当前,地热水最大降深如何确定方法很多,各地区因开采条件不同其最大允许降深也不完全相同。在基于地面沉降防控基础上以德州市城区为例,通过对地面沉降与深层地下地热水分析,建立起了地热水最大允许水位降深数值模型,并计算出新近纪明化镇组、馆陶组和古近纪东营组地热水开采最大允许水位降深值,确定了相似区域最大允许水位降深范围,这对层状孔隙裂隙热储地区热储最大允许水位降深确定和地热资源的可持续开发利用具有重要现实意义和理论参考价值。

**关键词:**层状孔隙裂隙热储;最大允许水位降深;地热水;地面沉降;数值模型

**中图分类号:**P314      **文献标识码:**A

**引文格式:**杨询昌.层状孔隙裂隙热储最大允许水位降深研究——以德州市城区为例[J].山东国土资源,2016,32(7):49-53.YANG Xunchang. Study on Maximum Allowable Drawdown of Layered Pore and Fractural Geothermal Reservoir——Setting Districts in Dezhou City as an Example[J].Shandong Land and Resources, 2016,32(8):49-53.

地热水最大允许降深主要是从地热资源及环境保护角度出发,在提高地热资源开发效益的条件下,综合考虑地热资源开发与地质环境、资源保护等因素确定。最大允许降深过大,势必会造成水位持续下降、水资源快速枯竭等一系列环境地质问题,并最终导致地面沉降等灾害的发生。当前,地热水最大降深如何确定的方法很多,各地区因开采条件不同其最大允许降深也不完全相同。我国北京、天津、河北、河南、山东等省市地热水可采量计算中最大降深一般根据经验选取50~300 m,最长年限取50~100年。根据以往研究成果,超量抽取地下液体造成地下水位大幅下降是区域性地面沉降产生的主要原因<sup>[1]</sup>。因此,该次在基于地面沉降防控基础上对地热水最大允许水位降深值进行研究。

## 1 地热水最大允许降深影响因素分析

地热水最大允许降深主要受技术、经济效益和资源环境保护等3个方面影响。

地热水最大允许降深影响因素主要包括3个方面:即技术、经济效益和资源环境保护。

从技术水平来看,随着钻探、取水技术手段的不断进步,目前多级潜水泵的扬程可达300 m以上。如河南省新乡市潜水泵厂生产的300QJ140-294/16-220型多级潜水泵,出水量140 m<sup>3</sup>/h,扬程达336 m,功率220 kW。因此,开采技术已不再是最大允许降深的瓶颈。

从经济效益来看,降深增大,会增加取水能耗,必然导致地热水取水成本的增加。但从理论计算和目前地热利用经济效益情况来看,允许降深可大于300 m。因此,经济条件也不是最大允许降深的限制条件。

从地热资源开发与地质环境、资源保护等角度出发,最大允许降深过大,势必会造成水位持续下降、水资源快速枯竭等一系列问题,并导致地面沉降等灾害的发生。

可见,地热水最大允许降深过大虽然从经济效益和技术水平已不是问题,但从地热资源开发与地质环境、资源保护等角度出发,最大允许降深不宜过大,过量开采地下液体最终可能会导致地面沉降等灾害的发生。地热水允许降深过小,经济效益必然

收稿日期:2015-05-18;修订日期:2016-06-15;编辑:陶卫卫

作者简介:杨询昌(1977—),男,贵州镇远人,工程师,主要从事水、工、环地质等方面的工作;E-mail:yangxunchang@sohu.com

会降低,也不利于地热资源的有效开采。因此,最大允许水位降深可在基于地面沉降防控基础上进行确定。

## 2 基于地面沉降防控下地热水最大允许降深分析

地面沉降主要受地下流体(深层地下水和地热水)开采影响,虽然目前地热水开采对地面沉降影响小,但长期开采地热水必然会加剧地面沉降的发生<sup>[2]</sup>。地下水位变化是研究分析地面沉降发展的最直接证据之一<sup>[3]</sup>。深层地下水与地热水属同一介质,其过量开采产生的沉降量计算公式相同,只是各参数不完全相同。因此,通过深层地下水与地面沉降关系分析,建立起深层地下水与地面沉降回归方程,然后通过地面沉降计算公式,可建立起地热水允许水位降深计算数值模型,从而计算出不同热储地热水最大允许水位降深。

山东省德州市城区热储类型属层状孔隙裂隙型热储,深层地下水长期过量开采已导致了明显的地面沉降等灾害的发生<sup>[4]</sup>,且区内深层地下水位与沉降量监测周期较长,资料齐全。因此,该次以德州市城区为例对地热水最大允许降深进行分析。

### 2.1 地质环境概况

德州市位于山东西北部,与河北省的衡水市及沧州市毗邻,构造单元上隶属于华北板块。区内 2 000 m 以浅主要地层为古近纪东营组,新近纪馆陶组、明化镇组,第四纪平原组。区内地热资源丰富,主要赋存于新近纪明化镇组下段、馆陶组和古近纪东组碎屑沉积岩中,为温热水型低温地热资源,热储类型属层状孔隙裂隙型热储<sup>[5]</sup>,开采热储层主要为馆陶组,其底板埋深 1 300~1 650 m,地层厚度 400~500 m。多年来,深层地下水(明化镇上段含水层组)的大量超采导致水位大幅下降,并产生了明显的地面沉降地质灾害。

### 2.2 地面沉降产生机理分析

德州地面沉降发生于 20 世纪 80 年代,主要由开采深层地下水产生<sup>[6]</sup>。当前,地热水开采产生的地面沉降缺少勘查与试验监测资料,但其机理相同,因此过量开采地热水也必然会加剧地面沉降的发生<sup>[6,12]</sup>。

地面沉降是一个复杂的工程地质、环境地质现象,同时也是一种地质灾害,它的形成是自然因素和

人为因素综合影响的结果<sup>[7]</sup>。目前认为,自然因素引起的地面沉降量很小可以忽略不计。人为因素中,超量开采地下水(包括地热水)造成深层承压含水层水位大幅度下降是产生地面沉降的主要外因,其原因是由于抽取地下水引起土层有效应力增加,从而使土层压密造成地面沉降。较大可压缩性的土层则是产生地面沉降的内因,地面沉降的实质是松散地层的压缩固结或压密,如滨海和黄河三角洲平原地区以及河流冲积平原地区,其原因是这些地区松散沉积层较厚,颗粒较细,沉积时间相对较晚,沉积速度快,孔隙度大,结构较疏松,具有多层承压含水层和中至高压缩性的粘性土层或淤泥质粘性土层,压缩空间较大,这些地面沉降的内在因素导致了地面沉降的发生。

### 2.3 地热水允许水位降深数值模型的建立

#### 2.3.1 地面沉降与深层地下水位变化情况

据德州漏斗的地下水位观测资料和 1965—2007 年地面沉降监测资料分析,地面沉降与深层地下水位密切相关。1991 年以前,深层地下水位埋深小于 80 m 时,地面沉降量较小,随着地下水位的持续降低,地面沉降量相应的增加。1991—2000 年,深层地下水位埋深由 79 m 急剧降至 111 m,水位标高高达-90 m,地面沉降量开始增加,漏斗中心沉降量达 517 mm,年沉降量为 57.4 mm。2000—2005 年,深层地下水位埋深由 111 m 降至 130 m,水位标高高达-109 m,地面沉降量迅速增加,漏斗中心沉降量达 936 mm,年沉降量为 83.8 mm。2005—2007 年,漏斗中心水位下降有所减缓,地面沉降速率也在减缓,年沉降量减至 45 mm(表 1)。

表 1 地面沉降与深层地下水位下降对比统计

| 时段        | 水位降深<br>(m) | 水位下降<br>速率(m/a) | 累积沉降<br>量(mm) | 地面沉降<br>速率(mm/a) |
|-----------|-------------|-----------------|---------------|------------------|
| 1965—1991 | 77.26       | 2.97            | 55            | 24.0             |
| 1991—2000 | 31.91       | 3.55            | 517           | 57.5             |
| 2000—2005 | 18.99       | 3.80            | 419           | 83.8             |
| 2005—2007 | 3.90        | 1.95            | 90.0          | 45.0             |

#### 2.3.2 德州地面沉降与深层地下水位相关性分析

根据德州市城区国棉一厂地面沉降量测量点(D36) 1991—2007 年实测数据,并根据阶段沉降速率恢复和计算每年的累积沉降量(表 2),对地面沉降与深层地下水位进行相关分析。由图 1 和表 1、

表 2 可以看出,德州漏斗地面沉降与深层地下水水位下降的同步性,深层地下水水位和地面沉降量相关程度较高,其相关系数为 0.994 7。可见,深层地下水超采造成水位大幅下降是地面沉降的主要诱发因素<sup>[8-9]</sup>。

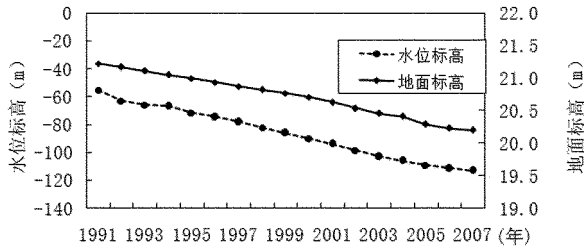


图 1 水位标高与地面标高历时变化对比曲线

表 2 沉降中心 (D36) 地面沉降量与深层地下水水位统计

| 年份   | 地面标高 (m) | 水位标高 (m) | 累积沉降量 (mm) | 年份   | 地面标高 (m) | 水位标高 (m) | 累积沉降量 (mm) | 相关系数   |
|------|----------|----------|------------|------|----------|----------|------------|--------|
| 1991 | 21.23    | -55.14   | 55.00      | 2000 | 20.71    | -90.05   | 572.00     | 0.9947 |
| 1992 | 21.17    | -63.10   | 112.50     | 2001 | 20.63    | -94.07   | 655.80     |        |
| 1993 | 21.11    | -65.77   | 170.00     | 2002 | 20.54    | -98.60   | 739.60     |        |
| 1994 | 21.05    | -66.74   | 227.50     | 2003 | 20.46    | -102.88  | 823.40     |        |
| 1995 | 21.00    | -71.42   | 285.00     | 2004 | 20.41    | -106.06  | 867.20     |        |
| 1996 | 20.94    | -74.52   | 342.50     | 2005 | 20.29    | -109.04  | 991.00     |        |
| 1997 | 20.88    | -78.13   | 400.00     | 2006 | 20.23    | -111.43  | 1047.00    |        |
| 1998 | 20.82    | -82.25   | 457.50     | 2007 | 20.20    | -112.94  | 1081.00    |        |
| 1999 | 20.77    | -85.96   | 515.00     |      |          |          |            |        |

### 2.3.3 地面沉降与深层地下水水位回归分析

根据漏斗中心 1991—2007 年深层地下水水位与地面沉降监测数据(表 2)进行线性拟合,可建立起德州城区深层地下水水位降落漏斗中心水位与沉降中心累积沉降量关系密切的拟合曲线(图 2)。根据拟合曲线形态、方差分析及判定系数大小判断,二次项曲线(二次拟合与三次拟合结果一样)和原始曲线的拟合程度较高,且符合实际,因此可作为德州城区地面沉降与水位之间关系表达式进行相关预测。其回归方程如下:

$$m = -321.78 - 1.5249h + 0.095h^2$$

式中: $m$  为地面沉降值 (mm);  $h$  为漏斗中心水位 (m)。

### 2.3.4 深层地下水最大允许水位降深值计算

深层地下水最大允许水位降深是指不发生快速地面沉降及不发生地面沉降地质灾害的深层地下水

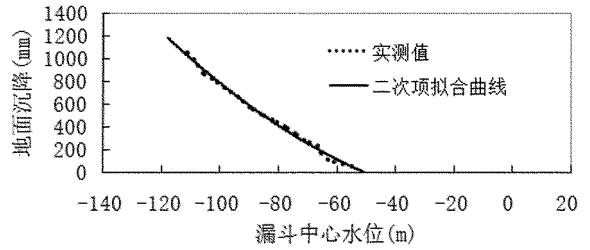


图 2 地面沉降与水位二次项拟合曲线

容许的最大允许水位降深。抽汲深层地下水,地层土体有效应力增加,土体主要是饱和粘性土释水变形,是地面沉降的根本原因,通过控制深层地下水的开采,保证深层地下水水位在一个合理范围,是控制地面沉降的唯一手段。因此,深层地下水开采引发地面沉降变化的阈值问题就尤其重要。

根据地面沉降与深层地下水水位拟合方程,取  $m$  为 0,可计算出临界水位  $h$ ,即地面沉降为 0(不发生快速沉降)的水位。然后根据水位和地面标高资料则可计算出容许最大允许水位降深  $\Delta h$ 。

临界水位降深  $h$ : 将  $m = 0$  代入回归方程:  $m = -321.78 - 1.5249h + 0.095h^2$ , 计算得  $h = -66.78$  m, 即德州市深层地下水临界水位为  $-66.78 \approx -67$  m。

允许水位降深  $\Delta h$ : 德州漏斗中心地面标高为 20.2 m, 则深层地下水允许水位埋深  $\Delta h = 86.98 \approx 87$  m。

### 2.3.5 地热水最大允许水位降深数值模型建立

由于含水砂层的压缩模量远大于粘性土的压缩模量,地面沉降主要是由粘性土的压缩造成的<sup>[10-12]</sup>,因此可按粘性土压密量公式进行计算。根据已有研究成果,抽取地下水(包括深层地下水或地热水)引起的地面沉降问题可按一维固结问题处理。假设各含水层的初始水位相同,开采地下水后,各含水层水位下降值也相同,均为  $\Delta h$ ,根据土力学原理,粘性土的最终压密量可按下式计算:

$$S_{\infty} = \frac{\alpha_v}{1 + e_0} \Delta p \cdot H_{\text{粘}}$$

$$\Delta p = \Delta h \cdot r_w$$

式中: $S_{\infty}$  为粘性土最终压密量 (mm);  $r_w$  为水的容重 ( $\text{kN/m}^3$ );  $\Delta h$  为含水层水位下降值,即最大允许水位降深值 (m);  $\Delta p$  为水位变化施加于土层的荷载 (kPa);  $\alpha_v$  为粘性土的压缩系数 ( $\text{MPa}^{-1}$ );  $H_{\text{粘}}$  为粘性土厚度 (m);  $e_0$  为粘性土初始孔隙比。

以上公式不仅符合深层地下水开采粘性土压密

量计算,同样也符合新近纪明化镇组下段、馆陶组和古近纪东营组等孔隙热储地热水开采粘性土压密量计算,且无论对哪一层流体压密量计算,其允许水位降深下最终地面沉降压密量( $S_{\infty}$ )都应该是相同的。因此,通过方程等量代换,可建立起不同热储流体开采最大允许水位降深计算数值模型:

$$\Delta h' = \frac{\alpha_v \cdot \Delta h \cdot H_{粘} \cdot (1 + e_0')}{\alpha_v' \cdot H_{粘}' \cdot (1 + e_0')}$$

式中: $\Delta h$ ( $\Delta h'$ )为深层地下含水层(计算热储层)最大允许水位降深值(m); $\alpha_v$ ( $\alpha_v'$ )为深层地下含水层(计算热储层)粘性土的压缩系数( $\text{MPa}^{-1}$ ); $H_{粘}$ ( $H_{粘}'$ )为深层地下含水层(计算热储层)粘性土累积厚度(m); $e_0$ ( $e_0'$ )为深层地下含水层(计算热储层)粘性土初始孔隙比。

### 3 不同热储地热水最大允许水位降深值计算

根据以上建立的数值模型可知,如果知道德州市城区深层地下水开采层位压缩层物理参数和各计算热储压缩层物理参数,然后将计算的德州市深层地下水最大允许水位降深值(87 m)代入上式数值模型计算,即可求得各热储地热水最大允许水位降深值。

根据已有资料及区内钻孔土力学试验测试指标,首先确定出德州市城区深层地下水与不同热储计算参数,然后根据已建立的数值模型即可求得德州市城区地热水开采最大允许降深。经计算,在基于地面沉降防控基础上,德州市新近纪明化镇组下段、馆陶组和古近纪东营组地热水开采最大允许降深分别为 102 m, 183 m, 287 m。参数选取与计算统计结果见表 3。由于各地区计算参数不同,因此其计算数值也不可能完全相同,因此,在缺少计算参数情况下,相似区域不同热储最大允许水位降深建议控制范围可分别取:80~100 m, 90~110 m, 150~200 m, 250~300 m。

表 3 计算参数选取及最大允许水位降深计算结果统计

| 参数                           | 明化镇上段(深层地下水) | 明化镇下段(地热水) | 馆陶组(地热水) | 东营组(地热水) |
|------------------------------|--------------|------------|----------|----------|
| 地层厚度(m)                      | 250          | 400~600    | 400~500  | 300~800  |
| 粘性土厚度(m)                     | 158          | 300        | 300      | 350      |
| 粘性土压缩系数( $\text{MPa}^{-1}$ ) | 0.17         | 0.07       | 0.04     | 0.02     |
| 粘性土初始孔隙比                     | 0.22         | 0.12       | 0.07     | 0.05     |
| 最大允许水位降深计算值(m)               | 87           | 102        | 183      | 287      |
| 最大水位降深建议控制范围(m)              |              | 90~110     | 150~200  | 250~300  |

注:粘性土压缩系数和粘性土初始孔隙比均取近似平均值。

## 4 结论

(1)总结了地热水最大允许降深影响因素,对地面沉降机理及其与深层地下水、地热水的关系进行了分析,并以德州市城区为例,在基于地面沉降防控基础上建立了地热水最大允许降深数值模型,计算得新近纪明化镇组下段、馆陶组和古近纪东营组地热水开采最大允许降深分别为 102 m, 183 m, 287 m;同时提出了缺少计算参数情况下相似地区对应热储地热水最大允许降深范围:90~110 m, 150~200 m, 250~300 m。

(2)建立的数值模型是直接已有数据和统计方法进行推导得出,理论依据充分,模型计算结果符合实际。该模型对深部地理系统进行抽象和概化的基础上,对基于地面沉降下的最大允许水位降深进行数学表达,为城市地下水(包括地热水)开采管理政策的执行及城市规划方案的制定和评估提供可行的技术支持,具有较好的应用前景。

(3)建立的数值模型主要建立在层状孔隙裂隙热储及各含水层压缩系数、厚度、初始孔隙比等力学参数基础之上。因此,在具有相关力学参数的同类层状孔隙裂隙热储地区,该模型对最大允许水位降深的确定和地热资源的可持续开发利用与管理具有重要现实意义和理论参考价值。

## 参考文献:

- [1] 王森,陆阳,郑玉萍,等.基于线性回归分析的地下水开采与地面沉降相关关系研究[J].中国水运, 2015, 15(7): 108-110.
- [2] 徐军祥,康凤新.山东省地热资源[M].北京:地质出版社, 2014.
- [3] 姜媛,田芳,罗勇,等.北京地区基于不同地面沉降阈值的地下水水位控制分析[J].中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 37-41.
- [4] 杨询昌,王成明,冯守涛,等.德州市城区地热水动态与开采量关系[J].山东国土资源, 2011, 27(7): 27-30.
- [5] 周世海,杨询昌,梁伟,等.德州市城区地热水人工回灌试验研究[J].山东国土资源, 2007, 23(9): 11-14.
- [6] 杨丽芝,刘春华,刘中业.德州深层地下水开采引发地面沉降变化阈值识别[J].水资源与水工程学报, 2010, 21(5): 55-60.
- [7] 邢忠信,李和学,张熟,等.沧州市地面沉降研究及防治对策[J].地质调查与研究, 2007, 27(3): 157-162.
- [8] 蔡文晓.德州市深层地下水开采与地面沉降关系研究[D].长春:吉林大学地球科学学, 2009.
- [9] 贾超,张国荣,王嘉斌,等.地下水开采诱发地面沉降研究及其

- 工程应用[J].地球科学与环境学报, 2015,37(4):102-104.
- [10] 罗跃,叶淑君,吴吉春,等.上海市地下水位大幅抬升条件下土层变形特征分析[J].高校地质学报, 2007,23(9):243-254.
- [11] 林黎,赵苏民,李丹,等.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, 2006,33(3):34-37.
- [12] 朱兴国,景北科,董星宏,等.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, 2002,24(2):234-239.

## Study on Maximum Allowable Drawdown of Layered Pore and Fractural Geothermal Reservoir ——Setting Districts in Dezhou City as an Example

YANG Xunchang

(Shandong Lubei Geo - ngineering Exploration Institute, Shandong Dezhou 253015, China)

**Abstract:** Nowadays, how to determine the maximum allowable drawdown of layered pore and fractural geothermal reservoir is still unsettled. Based on the control of land subsidence, taking Dezhou city as an example, through analysis on land subsidence and deep underground water, a numerical model has been established for the maximum allowable drawdown of geothermal water and the date of maximum allowable drawdown of the geothermal water mining of Neogene Minghuazhen group and Guantao group and Eogene Dongying group is calculated. Finally, the maximum allowable drawdown range of similar area is determined. This study has important practical significance and theoretical reference value for the study of maximum allowable drawdown of layered pore and fractural geothermal reservoir and the sustainable development and utilization of geothermal resources.

**Key words:** Layered pore and fractural maximum reservoir; allowable drawdown; geothermal water; land subsidence; numerical model