

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.02.009

引用格式:王明珠,万军伟,白通,等. 德州市德城区砂岩热储地热资源开采对地面沉降的影响[J]. 华东地质, 2021, 42(2): 202-209.

德州市德城区砂岩热储地热资源开采对地面沉降的影响

王明珠^{1,2}, 万军伟^{1,2}, 白通^{1,2}, 刘毅^{1,2}, 沈芳^{1,2}

(1. 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 德州 253072;
2. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 德州 253072)

摘要: 德城区是鲁西北砂岩热储地热资源开采的主要地区, 地热水开采是否对地面沉降造成影响尚未开展研究, 这将直接影响地方政府对地热资源开发的决策及规范管理。根据土体固结理论, 在相同固结条件下, 同等水位降幅, 热储层有效应力增量占该层自重应力的比值远低于深层地下水开采层有效应力增量占该层自重应力的比值。结合钻孔资料, 认为该区热储层为泥质胶结, 属半成岩状态, 其可压缩性远低于深层地下水开采层。结合该区地热资源开采政策, 通过分析已有的分层标监测数据, 发现在现状开采条件下, 该区砂岩热储地热水开采对地面沉降的影响不显著。

关键词: 砂岩热储; 地热水开采; 地面沉降; 德城区

中图分类号: P642.26; P314.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2021)02-202-08

地面沉降是由于自然因素或人类活动引发的松散地层固结、压缩导致地面高程降低的地质现象, 是一种缓变性的地质灾害^[1]。已有研究^[2-5]表明, 华北平原地面沉降的主要原因是过量开采地下水。山东省德州市德城区位于华北平原, 地面沉降严重^[6]。为控制地面沉降的发展, 德州市发布了深层承压水禁采通知^[7]。

地热资源开发利用对环境的负面影响较小, 被称为“清洁能源”, 广泛应用于洗浴、理疗、供暖和室内种植等领域, 具有较高的经济和商业利用价值^[8-10]。山东德城区砂岩热储地热资源开发利用程度较高, 目前, 地热水开采是否对地面沉降造成影响尚未开展相关研究, 在缺乏相关技术支持的情况下将直接影响地方政府对地热资源开发的决策, 也将影响地热资源主管部门对地热水开发利用的规范管理。地热水归为深层承压水而禁采将阻碍地热清洁资源的开发利用。本文从德城区分层标监测数据、土体固结理论和现有回灌技术论述砂岩热储地热资源开采对地面沉降的影响, 为相关部门合

理规划地热资源利用提供依据, 为今后研究砂岩热储地热水开采对地面沉降的影响提供参考。

1 德城区地热地质背景

1.1 热储特征及埋藏条件

馆陶组砂岩热储是德城区地热资源勘查及开采的目标热储。馆陶组在全区均有分布, 顶板埋深 1 026~1 195 m, 底板埋深 1 350~1 650 m, 与下覆东营组呈不整合接触。馆陶组厚度一般为 250~550 m, 在研究区中南部市区—于官屯—黄河涯镇一带较厚(一般>500 m), 向外围逐渐变薄; 西部及德州开发区馆陶组厚度一般约 400 m; 东部减河断裂以东由北向南馆陶组厚度逐渐增加。根据物探电测井、钻探岩屑录井资料, 馆陶组热储与地层的厚度比为 30%~40%, 热储厚度一般为 160~200 m。

垂向上, 馆陶组热储呈上细下粗的正旋回沉积, 底砾岩明显。根据沉积环境与岩性特征, 馆陶

* 收稿日期: 2020-04-25 修订日期: 2020-07-11 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局“山东省地面沉降综合评价(编号: HJ201922)”项目资助。

第一作者简介: 王明珠, 1990年生, 女, 工程师, 主要从事水工环地质研究工作。Email: 674758024@qq.com。

组热储可分为上、下两段:上段热储岩性较细,一般为浅灰色、灰白色粉细砂岩或细砂岩,单层厚度小,与泥岩互层,热储与地层厚度比约为 30%;下段热储岩性较粗,主要为细-中砂岩、灰白色含砾粗砂岩和砂砾岩,单层厚度大,与泥岩相间,热储与地层厚度比约为 40%。砾石成分以石英和黑色燧石为主,直径 1~10 mm,磨圆度中等,砂砾岩成岩性差,呈疏松状,孔隙度一般为 24%~30%。

1.2 地热水补径排关系

馆陶组热储层被多层泥岩覆盖,构成隔水顶板。地热水与上覆中层咸水、浅层淡水及大气降水无水力联系。地热资源属于可再生资源,前提是在其开发利用时进行地热尾水回灌,取热不取水。该区地热水除少量沉积物沉积时保留下来的沉积水和封存水外,绝大部分地热水为沉积物形成后在漫长的地质时期,由远、近山区侧向径流补给。地热水交替微弱,水平径流极其滞缓,补给条件差,再生能力弱,与上覆含水层之间无水力联系,基本为封闭系统。因此,地热水的运动特征不受现代水文、气象及地形地貌的影响,而受深层水文地球化学环境条件影响较大。人工开采是重要的排泄方式,此外还有在水力梯度下的水平运移。开采条件下,开采量主要来源于含水层的储变量^[11]。

1.3 地热水动态

地热水动态主要受人工开采动态影响,在冬季采暖期水位下降,非采暖期水位略回升,但水位整体呈下降趋势。开采量主要集中在冬季供暖期,用于洗浴的水量较小,对水位恢复无明显影响。降雨量主要集中在每年 7—8 月,该时间段为地热水水位恢复期,但不能说明降雨量能影响地热井的水位变化。

1997 年 3 月,德热 1 井成井时地热水埋深高出地面 8.33 m。2007 年后,德城区地热井迅速增多,地热水开采量急剧增加,至 2018 年 10 月产能测试的地热水水位埋深为 51.30 m,19 年水位下降达 59.63 m,平均每年下降 3.14 m。2007 年供暖期前,德城区地热井数量较少,地热开采量低,水位动态变化较稳定。1998 年 12 月,地热水最低水位埋深为 46.15 m,2005 年 11 月供暖期之前地热水最低水位埋深为 44.64 m。2006 年 3 月,地热水最低水位埋深为 13.90 m,开采量总体呈上升趋势。自 2013 年后,受地方政策及回灌影响,地热水开采量逐渐降低(图 1)。截止 2019 年 3 月,该区地热水的

最低水位埋深为 86.16 m,平均年水位下降率为 5.56 m/a。总之,德城区地热水的开采量总体上升,开采时间主要集中在供暖季。因德州市城区有少量洗浴用水,供暖季结束后,地热水仍有较小量的开采,但对水位恢复基本无影响^[12]。

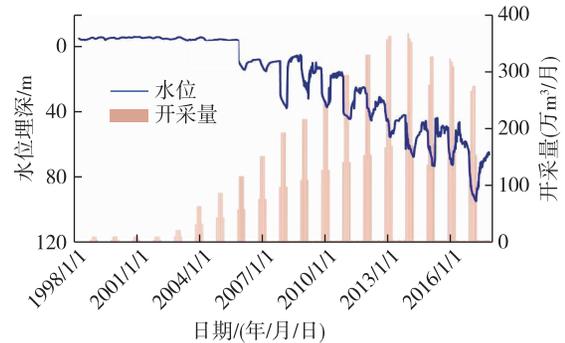


图 1 1998—2017 年德热 1 井开采量、水位动态变化图
Fig. 1 Dynamic variation diagram of exploitation quantity and water level of Dere well 1 from 1998 to 2017

1.4 地热资源开发利用概况

1997 年 3 月,华北石油康海实业公司水井工程大队在山东省鲁北地质工程勘察院施工完成了“德热 1 井”,该井为德州第一眼地热井。1999 年 12 月,山东省地勘局第二水文地质工程地质大队编写了“山东省德州市城区地热资源详查报告”^[13],在德州市经济开发区施工完成了第二眼同深度的地热井,开展了地热资源综合利用研究,协助建立了凯元温泉度假村的地热供暖、洗浴、室内外游泳池,开创了该区地热资源综合利用的先河^[14]。德城区主要开采馆陶组热储,地热水温 50~70℃,地热资源开发主要用于供暖,部分用于洗浴、理疗等。2019 年,德城区共有地热井 53 眼,多分布于运河以东居民小区,地热井年开采总量为 950 万 m³/a,近些年来德城区地热水开采量统计见表 1。

根据德城区地热井成井资料,该区地热井在降深 20 m 以内单井涌水量为 80~120 m³/h,水温为 54~58℃,水化学类型为 Cl-Na 型水,矿化度为 4 000~5 000 mg/L,水中含有对人体健康有益的微量元素。

2 地面沉降现状

2.1 地面沉降原因

从构造因素看,德城区属于华北地台,辽冀台向斜和鲁西台背斜,是新构造运动相对稳定的区

域。该区由构造运动引起的地面下沉速率为 2~3 mm/a,因此,区域构造及新构造运动不是地面沉降的主要因素。

表 1 德城区地热水开采量统计结果

Table 1 Statistics of geothermal water exploitation in Decheng district

年份	总开采量/ 万 m ³	开采季最大 水位埋深/m	累计开采量/ 万 m ³
2007	699.86	35.01	699.86
2008	843.46	26.13	1 543.32
2009	951.64	34.97	2 494.96
2010	1 095.57	43.88	3 590.53
2011	1 252.22	43.50	4 842.75
2012	1 380.21	51.80	6 222.96
2013	1 497.32	67.09	7 720.28
2014	1 331.58	72.17	9 051.86
2015	1 382.49	72.10	10 434.35
2016	1 247.04	94.16	11 681.39
2017	2 134.22	120.00	13 815.61
2018	1 625.40	92.44	15 441.01
2019	971.91	93.30	16 412.92

从工程角度看,德城区一般工程为建筑持力层与下卧层 1.5 m 以下的地层或高层建筑持力层与下卧层 30 m 以下的地层。区内场地属中软土、Ⅲ类一般建筑场地。不考虑基坑降水对地面沉降的影响,区内工程建筑物荷载引起的地面累计沉降量为 2~3 mm/a,说明该区工程因素不是地面沉降的主要原因。

从开采条件看,该区自开采深层地下水以来,地下水水位埋深不断下降,水头不断降低,深层地下水一直处于超采状态。由深层地下水降落漏斗图(2017年)与地面沉降量等值线图(1991—2017年)(图 2)可知,深层地下水降落漏斗中心与地面沉降中心位置一致,均处于国棉厂一带,且漏斗扩展范围和形状基本相似。

根据沉降原因,选取沉降中心(德城区国棉厂)(图 3)和沉降边缘(平原县城附近)(图 4)进行开采量、水位和累计沉降量分析。

多年来,由于地下水开采,深层地下水水位不断下降。2017年“德州市中心城区地下水压采工作方案”正式实施,预计至 2025 年,深层地下水开采井计划全部完成封填、封存,城区内水位呈现波动回

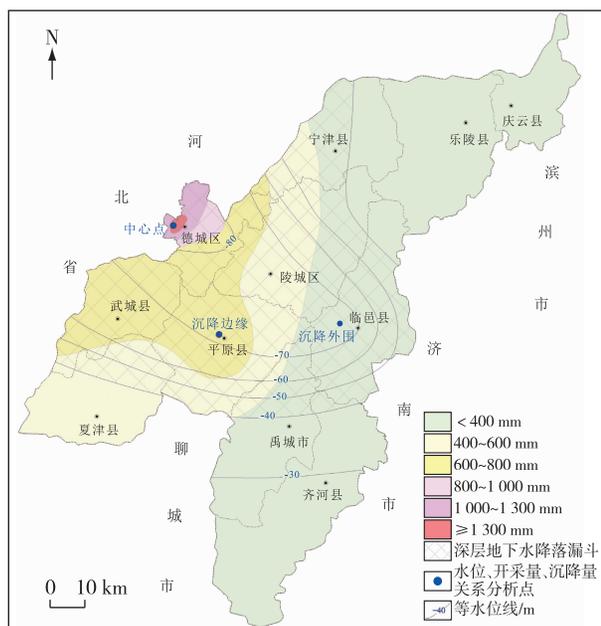


图 2 地下水降落漏斗与地面沉降分布图

Fig. 2 Distribution of groundwater funnel and land subsidence

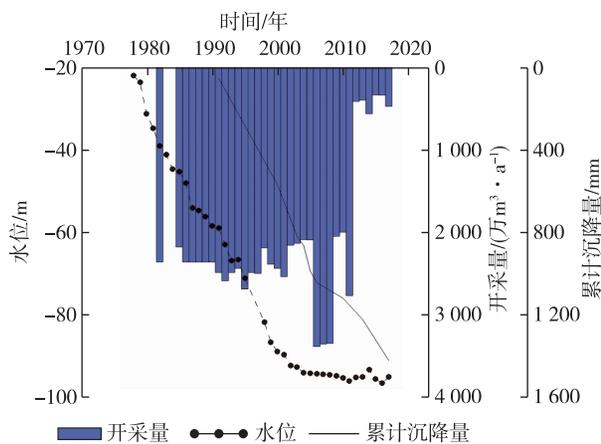


图 3 沉降中心开采量、水位及累计沉降量变化趋势图

Fig. 3 Variation trend of exploitation, water level and settling volume of subsiding center

升状态。然而,地面沉降是不可逆的地质灾害,随着地下水开采的不断进行,累计沉降量不断增加,但沉降中心区沉降速率有减小的趋势。

2.2 地面沉降发育现状

德州市地面沉降发生于 20 世纪 80 年代,包括德城区、武城、平原、陵县、宁津和河北省吴桥、景县、故城、诸县部分地区,与周边沧州、衡水地面沉降区连为一片,齐河县城也存在沉降现象^[15-16]。

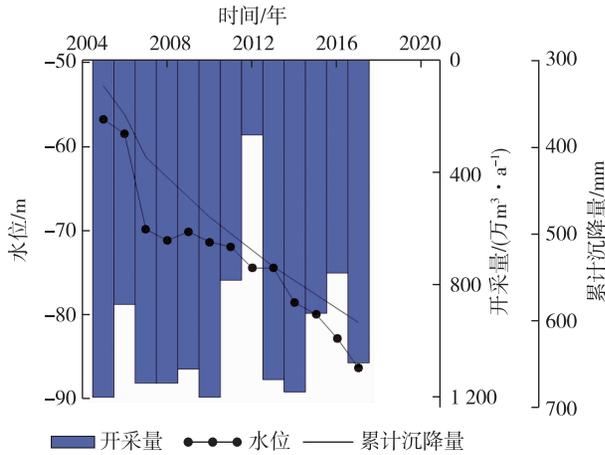


图 4 沉降边缘开采量、水位及累计沉降量变化趋势图
Fig. 4 Variation trend of exploitation, water level and settling volume of subsiding edge

结合二等水准测量、GPS 监测、InSAR 监测资料,1991—2017 年,德城区多年累计沉降量最大达 1 300 mm,主要分布在运河街道—广川街道—天衢街道,面积约 18 km²(图 5)。广川街道—宋官屯街道一线以西,多年累计沉降量 >1 000 mm,面积约 104 km²。新华街道—袁桥镇一线以西,多年累计沉降量 >800 mm,面积约 81 km²。德城区其他区域多年累计沉降量为 600~800 mm^[17]。

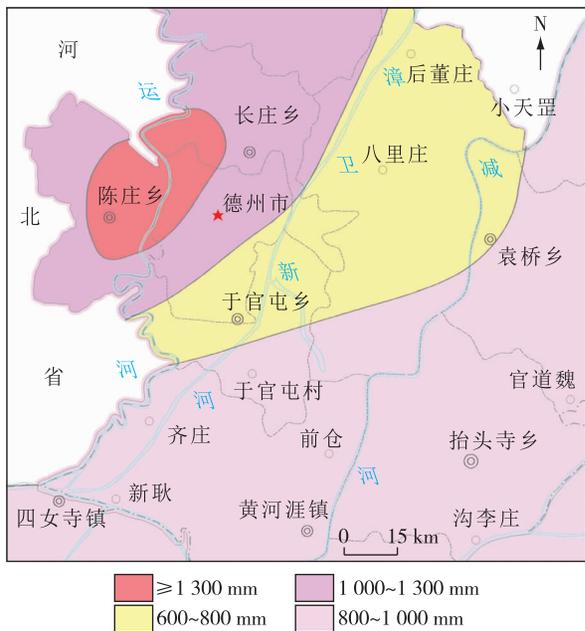


图 5 1991—2017 年德城区累计沉降量示意图
Fig. 5 Schematic diagram of accumulated settling volume in Decheng district from 1991 to 2017

3 地热资源开采对地面沉降的影响

3.1 分层标监测数据

2013 年,山东省地勘局第二水文地质工程地质大队在新址建立了 1 组地面沉降监测分层标^[18],埋设深度为 500 m、300 m、60 m、2 m 的 4 个分层标孔,该组分层标自 2015 年开始按照一月一次的频率进行相对沉降监测。

因该组分层标周围附近地区没有基岩标辅助测量,仅能对地面沉降进行相对沉降测量^[19-22],测出 60 m 以浅、60~300 m、300~500 m 地层的沉降数据。2015 年 1 月—2019 年 10 月,60 m 以浅地层累计沉降量为 6 mm,沉降速率为 1.3 mm/a;60~300 m 地层累计沉降量为 92 mm,沉降速率为 19.4 mm/a;300~500 m 地层累计沉降量为 77 mm,沉降速率为 16.2 mm/a;500m 以浅地层累计沉降量为 175 mm(图 6)。

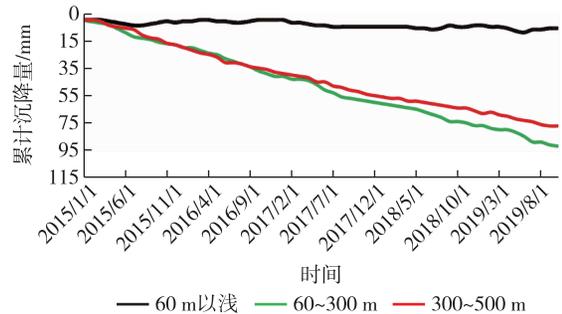


图 6 分层标各层累计沉降量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of accumulated settling volume of each layer

山东省地质环境监测总站分别于 2014 年 10 月和 2017 年 11 月对德州市进行了水准测量。根据测量结果,该组分层标地面标在此期间累计沉降量为 154.5 mm,年平均沉降速率为 51.5 mm/a。德城区因构造因素产生的垂直变形沉降速率为 2~3 mm/a,分层标测量结果显示 500 m 以浅地层年均沉降速率为 37.9 mm/a。因此,德城区 500 m 以深地层因抽取地下水引起的地面沉降度率为分层标地面标测量沉降量减去 500 m 以浅地层沉降速率和因构造因素引起的垂直变形速率^[23-24],可知 500 m 以深地层沉降速率为 11.1 mm/a。

根据德城区地下水开采井分布状况统计结果^[25],德城区深层地下水的主要开采层位为 300~

500 m 含水层,开采井总数为 170 眼,占总井数的 65%,实际开采总量为 2 231.2 万 m^3/a 。500~800 m 含水层,开采井总数为 93 眼,占总井数的 35%,实际开采量为 951.1 万 m^3/a ,占总开采量的 30%(表 2)。

表 2 深层地下水开发利用现状统计结果

Table 2 Statistics of development and utilization of deep groundwater

取水段/m	开采井		总开采量	
	数量/眼	比例/%	万 m^3/a	比例/%
300~500	170	65	2231.2	70
500~800	93	35	951.1	30

根据地层资料,300~500 m 及 500~800 m 压缩层的天然孔隙比分别为 0.25 和 0.10。500~800 m 层段开采量是 300~500 m 层段开采量的 54%,500~800 m 层段天然孔隙比是 300~500 m 层段的 40%。由于现实压缩因素涉及开采量、压缩层厚度、地层岩性组成,本文分别将 300~500 m 和 500~800 m 概化为 2 个天然孔隙比不同的相同介质地层,故推断 500~800 m 层段土体压缩量约为 8.2 mm/a。

根据水准及分层标监测数据,500 m 以深地层沉降速率为 11.1 mm/a,其中 500~800 m 层段土体压缩量约为 8.2 mm/a,800 m 以深地层压缩量约为 2.9 mm/a。

相对于 51.5 mm/a 的沉降速率,800 m 以深地层(2.9 mm/a)的压缩量,与构造引发的地层压缩量基本相同,故地热开采对地面沉降的影响不明显。

3.2 土体固结理论

以德城区为研究对象,地层埋深为 200~800 m,基本表现为超固结或微超固结状态。目前,已知地面沉降主要是超量开采中深层地下水引起的。

将 800 m 以浅地层和 1 000 m 以深热储层视为相同固结状态,其孔隙度视为一致,即地层饱和重度视为一致。对比相同水位降幅下增加的土层有效应力占各自地层自重应力的比值,判断地热开采是否会引发地面沉降。

3.2.1 有效应力原理

假设在抽水过程中土层总应力不变,孔隙水压力的减少必然导致土中有效应力的等量增加,引起土层压缩。潜水含水层、弱透水层及承压含水层的

孔隙水压力分布如图 7 所示。

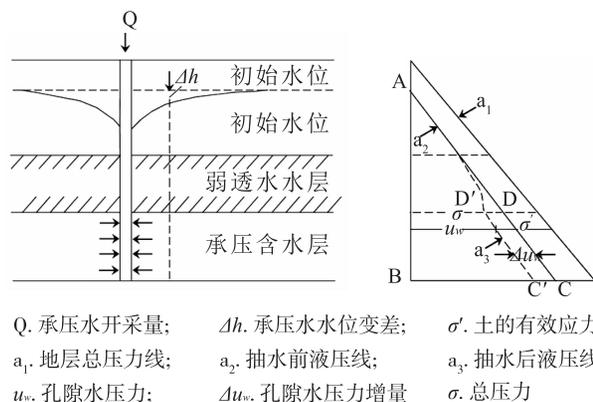


图 7 含水层孔隙水压力分布图

Fig. 7 Distribution of pore water pressure of aquifer

当承压含水层抽水后,产生 Δh 的水位降,则孔隙水压力分布为图中的 $AD'C'$ 线,即在抽水前后土层中的孔隙水压力产生了差值,计算公式为

$$\Delta u_w = \gamma_w \cdot \Delta h, \quad (1)$$

式中: Δu_w 为孔隙水压力增量, kPa; γ_w 为水的重度, kN/m^3 。

根据太沙基有效应力原理,在地表以下一定深度地层的总应力 σ 为该处有效应力 σ' 与孔隙水压力 u_w 之和,即

$$\sigma = \sigma' + u_w, \quad (2)$$

式中: σ 为总应力, kPa; σ' 为有效应力, kPa; u_w 为孔隙水压力, kPa。

在抽水过程中孔隙水压力下,总压力基本保持不变。抽水后,随着孔隙水压力消散,孔隙水压力 Δu_w 的下降值如转化为有效应力的增量 $\Delta \sigma'$,即获得以下公式

$$\begin{aligned} \sigma &= (\sigma' + \Delta \sigma') + (u - \Delta u_w), \\ \Delta \sigma' &= \Delta u_w \end{aligned} \quad (3)$$

3.2.2 地层应力状态

地层中的应力可分为自重应力、构造应力和来自地表的附加应力^[26]。自重应力是由地层重量引起的,是地应力的主要存在形式。

$$\sigma_z = \gamma_{\text{sat}} \cdot z, \quad (4)$$

式中: σ_z 为自重应力, kPa; γ_{sat} 为地层土的饱和容重, kN/m^3 ; z 为垂向深度, m。

3.2.3 a 值计算

将因水位降低引起的有效应力增量 $\Delta \sigma'$ 与该处地层自重应力 σ_z 的比值定义为 a 值(无特征意义,

方便论述),该值可间接反应水位降幅对地层压缩性的影响, a 值越大,有效应力变幅占地层自重应力比值越大,则水位降幅对应压缩量越大,反之亦然,公式为

$$a = \Delta\sigma' / \sigma_z \quad (5)$$

(1)深层地下水开采层 a 值计算。该层岩性主要为粉土、粉质黏土、黏土和含水砂层。各类土的饱和重度 $\gamma_{深}$ 约 18 kN/m^3 ,德城区深层地下水开采深度多为 $300 \sim 800 \text{ m}$,根据公式(4)计算的深层地下水开采层平均自重应力约 9.9 MPa 。

(2)热储层 a 值计算。该区地热开采深度多为 $1\ 000 \text{ m}$ 以深,开采层段为 $1\ 000 \sim 1\ 600 \text{ m}$ 。 $1\ 000 \text{ m}$ 以上地层饱和重度取值 18 kN/m^3 ,馆陶组以砂岩和泥岩为主,饱和重度 $\gamma_{热}$ 取值为 26 kN/m^3 。根据公式(4)计算的地层总平均自重应力约 33.6 MPa 。

假设水位降幅均为 5 m/a ,根据公式(1)计算获得的有效应力 $\Delta\sigma'$ 为 50 kPa ;根据公式(5)计算获得的热储层 $a_{深}$ 为 0.15% , $a_{热}$ 为 0.15% 。

计算结果表明,在相同固结条件下,同等水位降幅,热储层有效应力增量占该层自重应力的比值远低于深层地下水开采层有效应力增量占该层自重应力的比值。

根据钻孔资料, $300 \sim 500 \text{ m}$ 及 $500 \sim 800 \text{ m}$ 地层为正常固结,属松散地层。热储层地层为超固结,为泥质胶结,属半成岩地层,可压缩性远远低于深层地下水开采层,进一步佐证地热开采对地面沉降的影响不显著。

4 回灌补源及技术分析

4.1 回灌补源

地热水天然条件下补给微弱,长期集中区域、集中时段开采将导致储层压力下降,水位持续降低,地热供暖尾水温度较高,长期排放将造成资源浪费,对环境造成污染。回灌是解决上述问题最有效的措施^[27-29],不仅可以维持储层压力,减缓水位下降,避免直接排放产生的环境污染,而且可以通过冷水被热储层加热汲取更多的热能,从而保证地热资源的可持续开采。

2018年,山东省国土资源厅、山东省水利厅发布的“关于切实加强地热资源保护和开发利用管理的通知”要求开采孔隙热储型地热资源的回灌率不低于 80% ,形成了“同层回灌,取热不取水,以灌定采、采灌

均衡”的德州地热开采模式。在清洁高效的地热开采模式下,地热资源开采的实际开采量大大降低,削减了地热开采对地面沉降潜在的影响^[30-31]。

4.2 回灌效果

德城区热储开采及回灌层为砂岩热储。二十多年的地热开采导致地热水水位持续下降,水位埋深较大,具有良好的回灌空间,为地热回灌提供了基础条件。自2006年开始,该区进行了地热回灌技术研究,对地热井成井工艺、合理井距、回灌工艺流程等开展专题研究,地热水实现了梯级、循环、绿色及可持续利用模式。地热供暖采用热泵机组,实现了“采灌均衡、取热还水”,供暖尾水进行完全回灌。2016—2019年,利用德州市砂岩热储回灌示范工程连续开展3个供暖季的生产性回灌,以供暖尾水为回灌水源,回灌温度 30°C ,采用除砂、过滤、排气等尾水净化工艺,运用同层自然无压回灌模式,一采一灌,稳定回灌量为 $50 \sim 70 \text{ m}^3/\text{h}$,供暖尾水 100% 回灌,回灌效果良好。

5 结论

(1)1991—2017年,德城区多年累积沉降量最大达到了 $1\ 300 \text{ mm}$,面积约 18 km^2 。多年累积沉降量 $>1\ 000 \text{ mm}$ 的面积约 $10\ 418 \text{ km}^2$,多年累积沉降量 $>800 \text{ mm}$ 的面积约 81 km^2 ,其他区域多年累积沉降量为 $600 \sim 800 \text{ mm}$ 。

(2)德城区地热开采对地面沉降的影响不显著。在相同固结及同等水位降幅条件下,热储层有效应力增量占该层自重应力的比值远低于深层地下水开采层有效应力增量占该层自重应力的比值。热储层泥质胶结,可压缩性远远低于深层地下水开采层。

参考文献

- [1] 刘广润.论城市环境地质研究[J].火山地质与矿产,2001,22(2):79-83.
- [2] 贾三满,田芳,齐干.城市“慢性病”——地面沉降成因及综合防控对策[J].城市与减灾,2019(3):22-27.
- [3] 张雯,宫辉力,陈蓓蓓,等.北京典型区地面沉降演化特征与成因分析[J].地球信息科学学报,2015,17(8):909-916.
- [4] 薛禹群,张云.长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J].华东地质,2016,37(1):1-9.

- [5] 付延玲.宁波市地下水位动态与地面沉降预测分析[J].资源调查与环境,2014,35(2):141-146.
- [6] 王明珠.德州市地面沉降防治规划专题研究[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2018:23-30.
- [7] 德州市水利局.德州市地下水超采区综合整治实施方案[Z].德州:德州市人民政府,2016:23-30.
- [8] 秦耀军,张平平.山东省砂岩热储地热资源开发利用模式探讨[J].山东国土资源,2018,34(10):93-98.
- [9] 邓鼎兴.福州地区地热资源成生规律及潜在地热异常远景区分析[J].华东地质,2017,38(2):132-137.
- [10] 尤伟静,刘延锋,郭明晶.地热资源开发利用过程中的主要环境问题[J].安全与环境工程,2013(2):24-29.
- [11] 张平平.山东省地热资源综合评价[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2017:53-63.
- [12] 白通,张平平,周海龙,等.山东省地热尾水回灌示范基地建设[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2019:58-61.
- [13] 刘桂仪,董上茂,赵季初,等.山东省德州市城区地热资源详查报告[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,1999:38-42.
- [14] 王立东,张明德,彭磊.山东省德州市经济技术开发区小申庄 DR2 井地热资源储量报告[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2012:32-46.
- [15] 孙晓晓,段晓飞,战静华,等.鲁西北平原区地下水开采诱发地面沉降机理及防控措施研究报告[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2018:55-67.
- [16] 段晓飞,战静华,孙晓晓,等.鲁北地面沉降数值模拟研究报告[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2017:34-67.
- [17] 德州市国土资源局,德州市水利局.德州市地面沉降防治规划(2018—2025年)[Z].德州:德州市人民政府,2018:16-21.
- [18] 杨亚宾,万军伟,战静华,等.山东省德州市城市地质调查报告[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2015:44-58.
- [19] 田芳,罗勇,周毅,等.北京地面沉降分层监测动态变化特征[J].山东国土资源,2014,35(4):76-80.
- [20] 贾超,张国荣,何奔,等.德州市地面沉降数值模型[R].济南:山东大学,2014:47-52.
- [21] 何国荣,冯在敏,冯克印,等.水准测量网监测在德州市地面沉降中的应用[J].山东国土资源,2012,28(6):28-30.
- [22] 中华人民共和国国土资源部.DZ/T 0283—2015 地面沉降调查与监测规范[S].北京:地质出版社,2015:14-15.
- [23] 纪洪磊.滨州市地面沉降成因浅析[J].山东国土资源,2017,33(12):37-42.
- [24] 杨亚宾,赵季初.山东省德州市地面沉降地质调查与评价[R].德州:山东省鲁北地质工程勘察院,2007:43-58.
- [25] 冯颖,闫鹏飞,张静.山东省德州市地下水与地质环境监测报告(2019年度)[R].德州:山东省地勘局第二水文地质工程地质大队,2019:48-52.
- [26] 东南大学,浙江大学,湖南大学,等.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2005:120-136.
- [27] 张金华,魏伟,杜东,等.地热资源的开发利用及可持续发展[J].中外能源,2013,18(1):30-35.
- [28] 徐军祥,康凤新.山东省地热资源[M].北京:地质出版社,2014:60-100.
- [29] 张平平,张东生,刘胜利,等.商河县馆陶组热储地热尾水回灌可行性研究[J].山东国土资源,2015,31(8):50-53.
- [30] 赵季初.鲁北砂岩热储地热尾水回灌试验研究[J].山东国土资源,2013,29(9):24-31.
- [31] 吴立进,赵季初,李艾银,等.鲁北坳陷区地热资源开发利用关键性问题研究[J].地质与勘探,2016,52(2):300-306.

The influence of geothermal resources exploitation of sandstone thermal reservoir on land subsidence in Decheng District, Dezhou City

WANG Mingzhu^{1,2}, WAN Junwei^{1,2}, BAI Tong^{1,2}, LIU Yi^{1,2}, SHEN Fang^{1,2}

(1. No.2 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources (Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou 253072, Shandong, China;

2. Geothermal Resources and Reinjection Research Center of Shandong Province, Dezhou 253072, Shandong, China)

Abstract: Decheng district is the main area of geothermal resources exploitation of sandstone thermal reservoir in northwest of Shandong Province. However, whether geothermal water exploitation will affect

land subsidence has not been studied, which will directly affect the local government's decision-making and standardized management of geothermal resources exploitation. According to the theory of soil consolidation, under the same consolidation conditions and the same decrease of water level, the ratio of effective stress increment to self-weight stress of thermal reservoir is much lower than that of deep groundwater exploitation layer. Combined with the drilling data, it is considered that the thermal reservoir in this area is a semi-diagenetic state with argillic cementation, and its compressibility is far lower than that of deep groundwater exploitation. Based on the geothermal resource exploitation policy of this area, by analyzing the existing hierarchical standard monitoring data, it is found that the influence of geothermal water exploitation on land subsidence is not significant under the current mining condition.

Key words: sandstone geothermal reservoir; geothermal water exploitation; land subsidence; Dezhou district

· 成果快讯 ·

赣南宁都乡村振兴红层找水打井取得突破性进展

赣州宁都县是原国家级贫困县,部分扶贫产业基地位于红层盆地中部,“产业与人争水吃”现象突出,水源成了制约乡村振兴的瓶颈。中国地质调查局南京地质调查中心与长沙自然资源综合调查中心的技术人员联合技术攻关,开展了宁都县乡村振兴找水打井工作,取得了红层地区“五钻五捷、孔孔出水”的突破性成果。

(1)联合组队,齐心攻关。宁都县位于“红层盆地”中部蔬菜产业基地,水资源匮乏。地方自行筹资打井 10 口,仅 1 口成功,是找水的极困难区。两家单位抽调骨干技术人员组成找水打井突击队,查阅地质资料,科学运用遥感、调查、物探等手段,保障了此次工作的圆满成功。此次联合组队,进一步促进了局属各单位之间的业务融合,实现了优势互补。

(2)扎实苦干,五战五捷。两家单位共投入技术人员近 20 人,物探设备和水文地质调查设备各 1 套,车辆 4 台。在赣州酷热多雨的季节,历时约 20 日完成了宁都 3 处蔬菜基地找水打井专项水文地质调查、物探和井位确定工作,水文地质调查面积 15 km²,物探测线 13 条(10.6 km),确定井位 5 处。2021 年 5 月 9 日,长沙自然资源综合调查中心钻探队伍进场实施第一钻,5 月 10 日,该钻成功出水,井深 148 m,水量约 366 t/d。5 月 13 日,第二口井成功出水,井深 93 m,水量约 375 t/d。5 月 19 日、5 月 25 日、5 月 28 日,第三口井、第四口井、第五口井均成功出水。确定的 5 处井位,孔孔出水,5 口井日总水量近 1 600 t。

(3)办好实事,助力振兴。水井建成后,地质人分别为每一口水井起了一个具有美好寓意的名字:齐心井、崇善井、长胜井、永胜井、振兴井,每个名字代表着对老区人民的真挚情感和祝福。2021 年 6 月 1 日,恰逢《乡村振兴促进法》实施,该成果移交至宁都县政府,及时解决了宁都长胜镇旱埡、田头镇南必 1 650 亩蔬菜产业基地及周边 1 200 余人的用水问题。

(中国地质调查局南京地质调查中心 刘林,朱红兵,姜月华,方捷 供稿)