

天津地区雾迷山组水位降落漏斗演化特征 及合理开发利用探讨

宗振海, 闫佳贤, 殷肖肖, 李虎, 张森
(天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要:雾迷山组是天津地区地热资源开发利用的主要热储层,连续32年的开采已形成较大规模的水位降落漏斗,热储压力下降形势严峻。本文通过对多年的雾迷山组热储水位监测数据进行系统整理、分析,对漏斗的形成和演化规律做了初步总结,提出雾迷山组水位降落漏斗在人为开采和地热地质条件共同影响下,目前仍以4~6 m/a的下降速率向深部扩展;同时从水均衡的角度提出资源合理开发利用的建议,认为降低地热流体的消耗量是缓解乃至解决雾迷山组热储压力下降、实现资源可持续开发利用的唯一途径。

关键词:天津地区;雾迷山组;水位降落漏斗;合理开发利用

中图分类号: P597⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2018)04-0312-06

地热能是一种绿色低碳、可循环利用的清洁能源^[1],在我国华北盆地蕴藏丰富^[2]。地下热水广泛应用于地热供暖、温泉理疗、养殖、工农业等多个领域^[1]。天津地区于19世纪30年代拉开了地热研究、开发、利用的序幕,资源的持续大量开采导致了热储压力的不断下降;从最初大多数地热井能够自流到近几年已形成大面积的水位降落漏斗^[3]。其中开发利用规模最大的雾迷山组热储,2016年漏斗中心静水位埋深最大达到167 m,最大年降幅超过10 m^[4]。

本文通过对多年的水位、采灌量等数据进行综合分析,揭示了天津地区雾迷山组热储集中开采区漏斗的形成和演化规律;类比浅层地下水降落漏斗的演化特征,提出雾迷山组水位降落漏斗同样存在漏斗“夷平”现象,且压力在漏斗中心的带动下整体下降;分析了不同漏斗区漏斗形成的主要影响因素。本文还从水均衡的角度提出了资源合理开发利用的建议。

1 研究区概况

天津地区雾迷山组分布广泛,分布面积约4 083 km²,顶板埋深912~4 041 m,

钻孔最大揭露厚度1 278.52 m^[4],在蓟州地质剖面上其厚度达3 010 m,是以白云岩为主的碳酸盐岩^[5]。

本次研究区范围如图1所示,分布在天津市范围内天津断裂以东、汉沽断裂以南、沧东断裂以西地区,为Ⅲ级构造单元沧县隆起的一部分,包括潘庄凸起、双窑凸起和白塘口凹陷三个Ⅳ级构造单元,面积

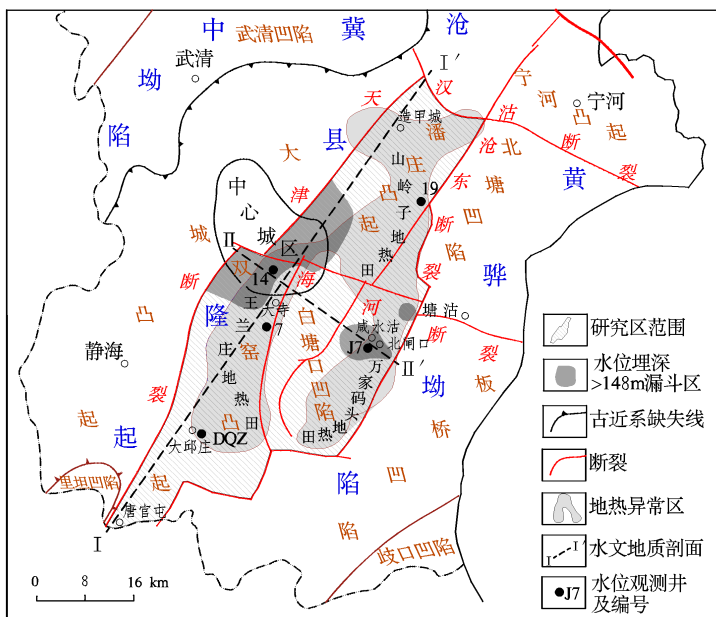


图1 研究区范围图
Fig.1 Map of the study area

收稿日期:2018-06-21

责任编辑:曾乐

资助项目:天津市地热资源动态监测(国土房任〔2016〕2号)

作者简介:宗振海(1983-),男,学士,工程师,从事地热地质、地热动态监测研究工作,E-mail: dryzzh@163.com。

约1 745 km²;研究区范围囊括了王兰庄地热田、山岭子地热田和万家码头地热田,是天津地区现有雾迷山组地热井的主要分布区,天津地区雾迷山组热储年开采总量的97%来自研究区内的雾迷山组地热井。

研究区内地热采灌量及水位监测数据来自天津市国土资源和房屋管理局地热动态监测数据库。国土资源和房屋管理局于20世纪90年代建立了天津市地热资源动态监测网,将地热资源动态监测作为一项长期进行的年度项目开展,项目承担单位为天津地热勘查开发设计院。项目监测范围覆盖整个天津市辖区的各个热储层,天津地热勘查开发设计院每年定期监测各个热储的利用状况,并将年度监测数据录入地热动态监测数据库。本文使用的水位数据均为每年度10月份监测数据。

2 雾迷山组开发利用情况

天津地区雾迷山组地热流体温度高达70~102℃,单井涌水量一般在80 m³/h以上,总矿化度一般为1 700~2 200 mg/L,良好的资源品质使其成为建筑供暖的优选热源^[3]。

天津地区开采井数量和开采量的增长经历了缓慢增长和急剧增长两个阶段。缓慢增长阶段是1985年至2012年期间,王兰庄地热田于1985年凿出第一眼雾迷山组地热井,山岭子地热田于1986年开凿出第一眼雾迷山组地热井。此后,该热储层开采井的数量便以平均每年3.4眼的速度缓慢增长,截至2012年开采井总数共计93眼;缓慢增长阶段开采量平均每年增加不到90万方,2012年度年开采量为1 676万方^[6]。急剧增加阶段发生在2013年至2017年期间,社会经济尤其是房地产业的快速发展造就了一批新兴小城镇,从而使地热资源供暖的需求不断增加,雾迷山组开采井以平均每年11.6眼的速度增长,2017年开采井总数达到151眼;开采量平均每年增加约185万方,2017年度年开采量为2 602万方。

2004年以后管理部门推行对井审批制度,鼓励新建地热井工程采用“一采一灌”方式开发利用地热资源,雾迷山组开采总量逐年增加的同时,回灌总量也随之增加,回灌率呈现总体递增的趋势,雾迷

山组地热流体的消耗量15年来始终保持在约1 000万方/年的规模(图2)。

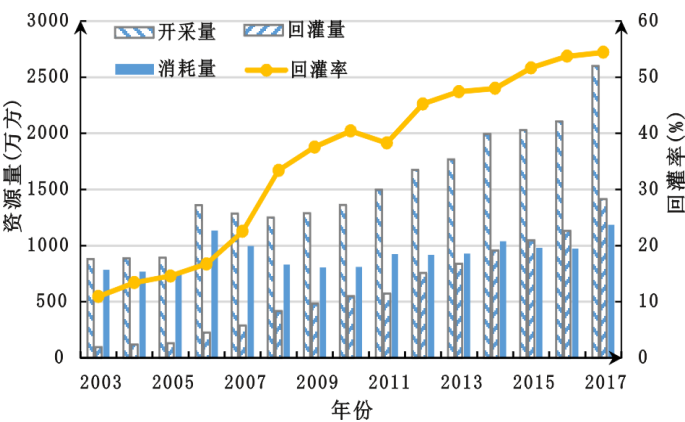


图2 雾迷山组历年开采和回灌量图
Fig.2 The annual production and injection charts of the Wumishan Formation

3 水位降落漏斗形态及演化

3.1 中心城区水位降落漏斗

中心城区水位降落漏斗形成于20世纪90年代,是以西北侧天津断裂为隔水边界、南部略向内凹的近似半圆状漏斗。该漏斗自形成后中心水位埋深以平均4.6~5.0 m/a的速率迅速向纵深发展;114 m水位埋深等值线在2007年至2011年以平均2.3 km/a的速率向西北以外的各个水平方向扩展。至2013年114 m水位埋深等值线已无法圈闭,118 m水位埋深等值线圈闭的漏斗面积为241 km²,2017年148 m水位埋深等值线圈闭面积为199 km²,漏斗中心位于南开区复康路-河东区卫国道,漏斗中心水位埋深为157 m(表1)。

河西区赵金庄-解放南路-河东区富民路一带为中心城区漏斗区南部略向内凹的部分,该区域内14号井水位监测数据显示:水位埋深由1997年的13 m

表1 中心城区水位降落漏斗要素表
Tab.1 Elements for groundwater depression cones in downtown area

时间	边缘水位埋深等值线 / m	漏斗面积 / km ²	漏斗中心位置	漏斗中心水位埋深 / m
2007	114	54	河东区卫国道	111
2009	114	146	南开区南京路-河东区卫国道	122
2011	114	280	河西区赵金庄-东丽区华明镇	129
2013	118	241	河西区赵金庄-东丽区华明镇	135
2015	130	210	南开区红旗南路-东丽区华明镇	153
2017	148	199	南开区复康路-河东区卫国道	157

下降至2017年的120 m,历年水位埋深均小于漏斗区边缘地带;平均下降速率为5.4 m/a,略高于漏斗中心。

3.2 津南区水位降落漏斗

津南区水位降落漏斗形成于2000年左右,2011年之后漏斗中心由咸水沽以东向西南偏移,至2017年形成以咸水沽-北闸口、葛沽为中心的水位降落漏斗。该漏斗自形成后中心水位埋深以平均4.5 m/a的速率迅速向纵深发展;水平方向扩展十分迅速,2007年至2017年期间甚至无法以固定的水位埋深等值线来圈闭漏斗范围。2007年98 m水位埋深等值线圈闭的漏斗面积为78 km²,2011年114 m水位埋深等值线圈闭的漏斗面积为3.3 km²,2017年148 m水位埋深等值线圈闭的漏斗面积为60 km²(表2)。漏斗区内J7号井水位监测数据显示:该井水位由2006年的92 m降至2017的145 m,平均下降速率为4.8 m/a。

表2 津南区水位降落漏斗要素表
Tab.2 Elements for groundwater depression cones in Jinnan area

时间	边缘水位埋深等值线 / m	漏斗面积 / km ²	中心位置	中心水位埋深 / m
2007	98	78	咸水沽以东	103
2009	106	104	咸水沽以东	110
2011	114	3.3	咸水沽以东	115
2015	130	78	咸水沽-北闸口	152
2017	148	60	咸水沽-北闸口、葛沽	157

4 雾迷山组水位下降总体形势

西青区大寺镇、东丽区东丽湖温泉度假旅游区和静海区团泊镇等也是雾迷山组开采相对集中的区域,这些区域虽尚未形成明显的水位降落漏斗,但水位下降趋势仍然明显。根据大寺镇7号井和东丽区19号井30年来的动态监测数据,其水位埋深均由成井时的+38 m左右下降到2017年的139 m、131 m,平均下降速率分别为5.3 m/a、5.6 m/a。静海区DQZ号井水位埋深由1992年的24 m下降至2017年的146 m,平均下降速率为4.9 m/a。

根据研究区内不同构造位置的雾迷山组历年水位观测井数据(图3)可以看出:不同构造位置的地热井在同一年份水位埋深相差很大,但随时间延续,水位埋深差距有减小的趋势,水位下降速率相差不大,但水位埋深大的井下降速率较低。在所列出的水位观测井中,1997年水位埋深最浅为13 m(14号井),最深的

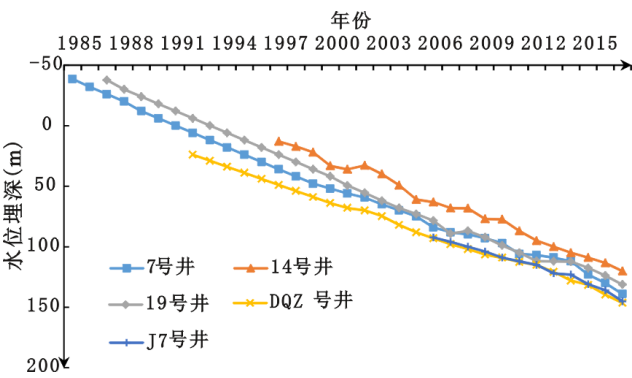


图3 研究区观测井历年水位变化图
Fig.3 The change of water level in the observation wells in the research area

49 m(DQZ号井),相差36 m;至2017年水位埋深最浅为120 m,最深为146 m,相差16 m。水位多年平均下降速率都在4.7~5.6 m/a范围内,但水位埋深相对较深的DQZ号井平均下降速率为4.7 m/a,水位埋深相对较浅的14号井平均下降速率为5.4 m/a。

采用GMS(Groundwater Modeling System)软件将2007—2017年雾迷山组水位埋深等值线图进行三维可视化后,可以更直观地看出研究区雾迷山组水位下降形势(图4、图5)。中心城区水位降落漏斗垂向发展的同时向北东、南西水平扩展,漏斗中心逐渐变得平缓、下降速率减缓,但横向扩展明显,夷平作用^[7]削低了大寺镇附近水位高值区。2007年北闸口镇附近尚未形成明显的水位漏斗,至2017年津南区水位降落漏斗已扩展至Ⅱ-Ⅱ'剖面。

总体来看,研究区雾迷山组水位在中心城区和津南区水位降落漏斗的带动下呈现整体下降趋势,在整体下降过程中原有的水位高值区被逐渐削平、主要漏斗区中心水位下降相对减缓,水位漏斗的夷平作用明显。

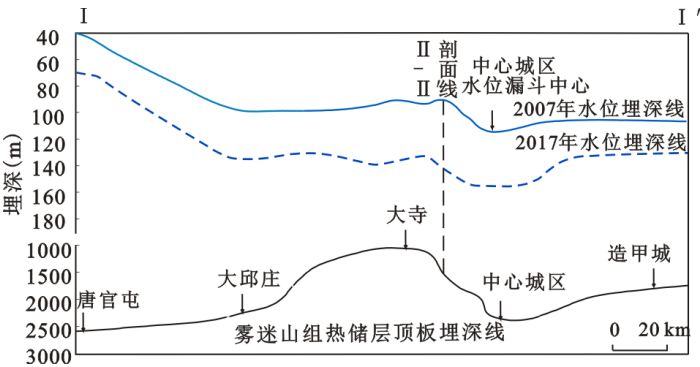


图4 I-I'水文地质剖面图
Fig.4 I-I' hydrogeology profile

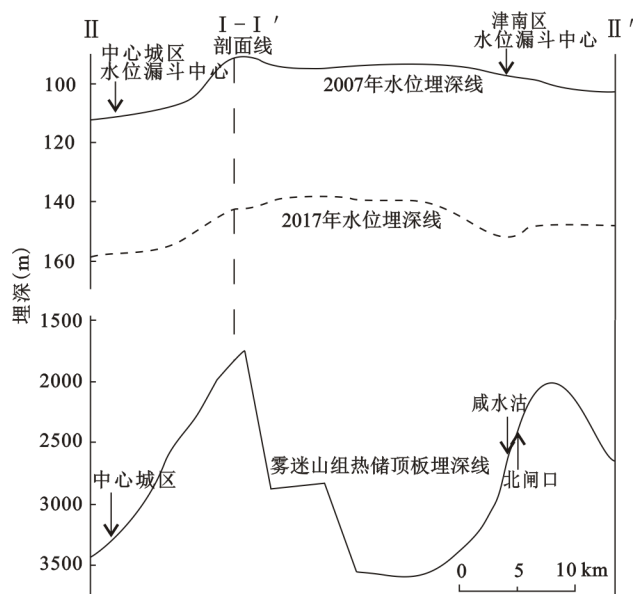


图5 II-II'水文地质剖面图
Fig.5 II-II' hydrogeology profile

5 水位降落漏斗的形成因素

承压含水层地下水位下降漏斗形成主要是强采地下水的结果,但是同时也受区域地质和水文地质条件控制^[8]。天津地区早期地热开采回灌率严重偏低,采灌失衡,导致热储层压力大幅度下降,形成区域性的降落漏斗^[9]。目前雾迷山组热储在天津多地区形成水位降落漏斗,其中以中心城区和津南区水位降落漏斗规模最大,热储压力最低^[4]。

5.1 中心城区水位降落漏斗

中心城区水位降落漏斗的形成主要受规模化人工开采和地热井布局影响^[4]。早期开凿的雾迷山组地热井多为单井开采,没有配套回灌井,至2017年中心城区雾迷山组回灌井仅28眼,约占开采井数量的53%;回灌量为518万方,占开采量的51%。中心城区雾迷山组开采井分布密集,2017年开采井数量占天津地区雾迷山地热井总数的35%,开采量占总开采量的39%,地热流体年消耗量为489万方,占年度总消耗量的40%。冬季集中开采期内,多井开采引起的水位漏斗互相叠加形成大面积的水位下降漏斗。

中心城区的地热地质条件是其雾迷山组水位降落漏斗形成的客观因素。首先,雾迷山组顶板埋深达2 704~3 048 m,天然的位置水头相对较低;其次天津断裂北东向穿过中心城区形成隔水墙,切断了来自西北方向的补给;再次,中心城区大部分区域雾迷山组渗透系数仅为0.28~0.77 m/d,单位涌水量不

足 $4 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$,径流条件相对较差。

中心城区水位降落漏斗南部凹进部分主要受地热地质条件影响,人工开采属次要因素。该区域雾迷山组顶板埋深仅为1 270~1 600 m,具有较高的位置水头;由于受北西西和南南东向拉伸型断裂构造影响,储层裂隙发育,渗透系数达2.2~3.3 m/d,单位降深涌水量最高达 $9.23 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$,径流条件相对较好^[3]。

5.2 津南区水位降落漏斗

津南区白塘口凹陷内奥陶系上覆地层为石炭—二叠系,深度大多超过2 500 m,水动力条件较差,除断裂附近有岩溶发育外,赋水性总体较差^[10]。一些原本设计开凿奥陶系的地热井,为达到良好的资源品质又兼顾勘探投资的经济性,往往将开采井加深至雾迷山组,而保留具有较强回灌能力的奥陶系回灌井。至2017年,津南区有6处雾迷山组—奥陶系异层采灌系统。

随着生态型新城镇的快速建设和防霾减排要求的落实,采用地热资源进行集中供暖的规模逐渐加大,至2015年仅咸水沽镇和北闸口镇地热供暖面积已达315万 m^2 ^[11-12]。津南区雾迷山组回灌井仅有13眼,占开采井数量的59%,年回灌量也仅为85万方,占开采量的50%^[4]。因此,规模化的集中开采和较低的回灌率是津南区雾迷山组水位降落漏斗形成的主要原因,但同时该区较差的地热地质条件也是漏斗扩展迅速的重要因素。

6 合理开发利用探讨

天津地区中生代前经历了三次较大的海侵和海退,期间古海水封存、风化剥蚀和溶蚀淋滤等综合作用使古大气降水稀释了古海水并封存于基岩裂隙中,成为现在的地热流体。这个形成过程经历了漫长的地质历史时期,地热流体年龄在1.6~2.7万年之间,埋藏深且流动很缓慢^[13],天然状态下与外界不发生循环交替或水力联系微弱。而人类规模化开发雾迷山组地热流体至今仅32年,已造成大范围的水位降落漏斗。显然,完全依靠地热流体的天然补给是远远不够的。

在研究区91%面积内,以开采100年(2007—2107)、水位埋深不超过200 m(降深89 m)为约束条件评价出的雾迷山组热流体可采量为 $12.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[13]。2007—2017年(时间跨度为资源评价期的

1/10)雾迷山组实际累计消耗地热流体 $1.04 \times 10^8 \text{ m}^3$, 实际水位降深46 m。由现有数据可以看出:过去10年内雾迷山组地热流体的消耗量控制在了评价结果1/10以内,但水位降深已经超过设计值的1/2。

通过本文前面的叙述,多年来雾迷山组地热流体尽管开采规模不断扩大,回灌量也逐年提高,年度消耗量基本稳定在1 000万方/年。自1985年至今32年间所取得的水位数据显示雾迷山组水位下降趋势为直线型,即下降速率没有明显加剧,这与消耗量较为稳定相对应。持续开展的地热回灌工作在补给热储资源、维持消耗量稳定方面起到至关重要的作用,是防止水位加速下降的有效手段^[14]。然而与开采量相比,目前回灌量仅占50%左右,地热资源仍然收支不平衡,自开采至今长期处于负均衡状态。在这种情况下,可持续开采面临很大困难^[15]。

今后的雾迷山组开发利用应进一步注重热储的水均衡状态,因为人工开采已经成为地热流体的主要排泄方式,其强度远大于地热流体的天然补给。长期的负均衡状态造成了热储压力的持续下降,只有改变水均衡状态,热储压力下降的问题才能够得以缓解乃至解决。改变水均衡状态就是要降低直至避免地热流体消耗量,可采用的具体措施包括取消地热井的消耗性用途,关停无法资源整合的单井系统,确保对井采灌系统按规范运行等。

7 结论

(1)持续32年的地热开采造成了天津地区雾迷山组热储压力大幅下降,在中心城区、津南区形成了规模较大的水位降落漏斗,漏斗中心目前仍以4~6 m/a的速率向深部扩展,同时由于漏斗的夷平作用使得漏斗横向扩展迅速。

(2)漏斗形成的主要因素首先是规模化的人工集中开采和早期只采不灌的开发利用模式,其次受热储补给条件、裂隙发育情况等地热地质条件制约,另外开采回灌布局对漏斗的形成也起到一定的影响。

(3)雾迷山组流体多年来消耗量基本稳定在1 000万方/年,水位下降趋势为直线型,下降速率相对稳定。地热开采规模扩大的同时,持续开展的回灌工作在补给热储资源、维持消耗量稳定方面起到了至关重要的作用,避免了水位的加速下降。

(4)长期的负均衡状态造成了热储压力的持续下降,降低或避免地热流体的消耗量,维持热储水资源的收支均衡是缓解乃至解决雾迷山组热储压力下降、实现资源可持续开发利用的唯一途径。可采用的具体措施包括取消地热井的消耗性用途、关停无法资源整合的单井系统、确保对井采灌系统按规范运行等。在超采和严重超采区,严禁新增开采量,严禁增加地热井数,提高回灌井数量,增加回灌量。

参考文献:

- [1] 曾梅香,赵苏民,孙世煜,等.天津温泉志[M].天津:天津市科学技术出版社,2017.
- [2] 陈墨香,华北地热[M].北京:科学出版社,1988.
- [3] 田光辉,蔡芸,刘东林,等.天津市地热资源开发利用动态监测(2013—2015)综合研究报告[R].天津地热勘查开发设计院,2016.
- [4] 宗振海,高新智,蔡芸,等.2016年度天津市地热资源开发利用动态监测报告[R].天津:天津地热勘查开发设计院,2016.
- [5] 天津市地质矿产局.天津市区域地质志[M].北京:地质出版社,1992.
- [6] 田光辉,宋美钰,刘东林等.2012年度天津市地热资源开发利用动态监测报告[R].天津地热勘查开发设计院,2013.
- [7] 张念龙,张希中,等.地下水位降落漏斗的形成及夷平作用[J].地下水,2001,23(2):76-77.
- [8] 李亚松,费宇红,钱永,等.沧州地区深层地下水位降落漏斗演变特征与形成机理探讨[J].干旱区资源与环境,2013,27(1):181-184.
- [9] 马凤如,林黎,王颖萍,等.天津地热资源现状与可持续性开发利用问题[J].地质调查与研究,2006,29(3):222-228.
- [10] 江国胜,赵苏民,李虎,等.天津市奥陶系热储赋水规律研究[R].天津地热勘查开发设计院,2015.
- [11] 宗振海,王光辉,刘东林,等.天津市津南区北闸口镇生态型新城镇地热示范工程建设专题报告[R].天津地热勘查开发设计院,2014.
- [12] 刘东林,蔡芸,宗振海,等.天津市津南区金丰里地热资源综合利用示范工程建设专题报告[R].天津地热勘查开发设计院,2015.
- [13] 胡燕,林黎,林建旺等.天津市地热资源可持续发展潜力评价报告[R].天津地热勘查开发设计院,2007.
- [14] 刘杰,宋美钰,田光辉,等.天津地热资源开发利用现状及可持续发展利用建议[J].地质调查与研究,2012,35(1):67-73.
- [15] 刘杰,宋美钰,于彦,等.天津市地热资源可持续利用管理模型研究[J].地质调查与研究,2017,45(4):315-320.

Evolution characteristics of the Wumishan Formation depression cones in Tianjin area and discussion of rational development and utilization

ZONG Zhen-hai, YAN Jia-xian, YIN Xiao-xiao, LI Hu, ZHANG Sen

(Tianjin Geothermal Exploration and Development-Designing Institute, Tianjin 300250, China)

Abstract: Wumishan Formation is of Jixian Series the major geothermal reservoir stratum for the development and utilization of geothermal resources in Tianjin. Several large-scale groundwater depression cones have been formed during nearly 30 years exploitation, and the groundwater pressure is declining rapidly. This article summarizes the preliminary rules of the formation and evolution of the depression cones based on many years of monitoring data about the level in the Wumishan Formation. It is proposed that with the influence of artificial exploitation or geothermal and geological conditions, depression cones of the Wumishan Formation are still spreading to deep with a value of 4~6 m/a. Reasonable development and utilization suggestion with resources also be provided on the perspective of water balance. It is considered that reducing the consumption of geothermal resources is the only way to alleviate or even eliminate the thermal storage pressure declining and achieve the sustainable utilization of the resources.

Key words: Tianjin area; Wumishan Formation; groundwater depression cone; reasonable development and utilization

《地质调查与研究》征订启事

经国家科委和新闻出版署批准,我刊《前寒武纪研究进展》于2003年起更名为《地质调查与研究》。办刊宗旨:本刊为地质科学领域中的学术性刊物,执行党的基本路线及国家的出版政策法规,坚持“百花齐放,百家争鸣”的双百方针,面向地质调查和研究工作,为地质调查和研究成果提供交流载体,推动我国地质调查和研究工作的开展,为我国的经济建设和发展服务。主要刊登内容:地质调查和研究中的新认识、新成果、新进展,地区性、专业性焦点、难点问题讨论,新理论、新技术、新方法、新工艺的研究和引进。内容涉及基础地质、矿床地质、同位素地质年代、第四纪地质、水资源与环境、灾害地质、城市地质、农业地质、地球物理勘查、地球化学勘查、地质调查信息等领域,以及国民经济和社会发展对地质工作的需求等方面的文章,亦刊登国外相关领域的研究动态和成果。主要开设栏目:基础地质、矿产资源、水文地质、灾害地质、环境地质、技术方法等,非常适合地质工作者、地质院校师生和有关单位的管理者阅读参考。

本刊为80页的季刊,每期约12万字,铜版纸印刷,公开发行,可全年订阅,也可分期订阅。订阅办法:1)单位和个人均可向我刊编辑部订阅;2)邮局汇款地址:天津市河东区大直沽八号路4号编辑部,邮编:300170;3)银行信汇:天津市河东区工商行大直沽分理处,账号:0302040109006621382。

联系电话:022-84112950。

本刊编辑部