

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.02.06

闫佳贤,张森,宗振海,秦冬时,沈健,李虎,殷肖肖. 2024. 天津市馆陶组热储集中开采区热储压力恢复原因分析[J]. 华北地质, 47(2): 54-61.
Yan Jiaxian, Zhang Sen, Zong Zhenhai, Qin Dongshi, Shen Jian, Li Hu, Yin Xiaoxiao. 2024. Analysis of the reasons for the recovery of thermal reservoir pressure in the geothermal concentrated mining area of Tianjin Guantao Formation[J]. North China Geology, 47(2): 54-61.

天津市馆陶组热储集中开采区 热储压力恢复原因分析

闫佳贤^{1,3}, 张森^{2,3}, 宗振海^{1,3}, 秦冬时⁴, 沈健^{1,3}, 李虎^{1,3}, 殷肖肖^{1,3}

(1. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300000; 2. 天津市地热资源开发有限公司, 天津 300000; 3. 自然资源部天津中低温地热野外科学观测研究站, 天津 300000; 4. 内蒙古自治区地质调查研究院, 呼和浩特 010000)

摘要: 地热是一种清洁能源, 局部集中开采会形成压力降落漏斗。【研究目的】天津地区由于地热开发历史长, 形成了大范围压力降落漏斗。2018年开采量逐步减少后, 漏斗中心地带的水位开始迅速回升, 热储压力开始恢复。但水位回升与开采量变化的相关关系、漏斗形态会发生哪些变化, 目前研究较少, 发展规律认识不够清晰。【研究方法】本文以天津地区新近系馆陶组热储层采灌条件下多年水位动态变化特征为例, 通过采灌量和水位的相关关系分析, 研究漏斗区水位动态演化规律, 分析压力恢复的原因, 并给出漏斗区地热可采量评价的合理建议。【研究结果】研究认为热储水量持续“人不敷出”是水位降落漏斗形成的根本原因, 而群井抽水叠加效应导致热储压力的同步波动, 消耗量骤减和漏斗的夷平作用使得漏斗中心区域水位回升。【结论】地热评价和管理应以漏斗区域内热储压力的实时动态为基准, 合理控制消耗量, 维持水量收支平衡, 是地热资源持续利用的有效途径。

关键词: 地热资源; 水位降落漏斗; 夷平作用; 天津地区

创新点: 文章针对天津市馆陶组热储层, 创新分析了近年来消耗量减少后夷平作用对热储水位降落漏斗发展的影响, 对于该热储层资源评价及科学开发具有一定的指导意义。

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 2097-0188(2024)02-0054-08

Analysis of the reasons for the recovery of thermal reservoir pressure in the geothermal concentrated mining area of Tianjin Guantao Formation

YAN Jiaxian^{1,3}, ZHANG Sen^{1,3}, ZONG Zhenhai^{1,3}, QIN Dongshi⁴,
SHEN Jian^{1,3}, LI Hu^{1,3}, YIN Xiaoxiao^{1,3}

(1. Tianjin Geothermal Exploration and Development-Designing Institute, Tianjin 300000, China; 2. Tianjin Geothermal Resources Development Co., Ltd, Tianjin 300000, China; 3. Observation and Research Station of Tianjin Medium-Low Temperature Geothermal, Tianjin 300000, China; 4. Inner Mongolia Institute of Geological Survey and Research, Hohhot 010000, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal geology.

收稿日期: 2022-01-25

基金项目: 天津市规划和自然资源局项目“天津市地热资源开发利用动态监测项目”(HYGP-2020-C-026)

作者简介: 闫佳贤(1985-), 女, 工程师, 硕士, 中国地质大学(北京), 从事地热地质、地热动态监测研究工作, E-mail: 562647991@qq.com。

<http://hbdz.org.cn> 华北地质, 2024, 47(2)

Geothermal is a clean energy source, and local concentrated extraction of geothermal fluid will cause a pressure depression cones. **[Objective]** Due to the long history of geothermal development, multiple large-scale pressure depression cones have been formed in the Tianjin area. Since 2018, the water level in the center of the cones began to rise rapidly and the thermal reservoir pressure began to recover after the gradual reduction of mining output. However, there are few studies on the correlation between the water level rise and the change of mining output, and what changes will happen to the cone shape, and the understanding of the evolution law is not clear enough. **[Methods]** This article takes the dynamic changes of water level in the Guantao Formation of the Neogene in Tianjin as an example, analyzes the correlation between extraction and reinjection volume and water level, studies the dynamic evolution law of water level in the cone area, analyzes the cause for pressure recovery, and provides reasonable suggestions for evaluating geothermal recoverable amount in the depression cones. **[Results]** The study suggests that the continuous "insufficient inflow" of thermal reservoir water is the fundamental cause for the formation of a pressure depression cone, while the combined effect of group wells pumping leads to synchronous fluctuations in thermal reservoir pressure, a sharp decrease in consumption, and the flattening effect of the cone causing the water level in the central area of the cone to rise. **[Conclusions]** Geothermal evaluation and management should be based on the real-time dynamics of thermal reservoir pressure in the cone area, and reasonable control of consumption and maintenance of water balance are effective ways for the sustainable utilization of geothermal resources.

Key words: geothermal resources; groundwater depression cones; planation; Tianjin city

Highlights: The article analyzes the impact of flattening on the evolution of depression cone in the thermal reservoir of the Guantao Formation in Tianjin after the reduction of consumption in recent years, which has certain guiding significance for the evaluation and scientific development of the geothermal resources.

About the first author: YAN Jiaxian, female, born in 1985, master, senior engineer, engaged in geothermal geology and geothermal dynamic monitoring, E-mail: 562647991@qq.com.

Found support: supported by Tianjin Municipal Bureau of Planning and Natural Resources (No. HYP-2020 C-026)

在天然状态下,地热流体的补给、径流、排泄维持动态平衡,水动力场处于相对稳定状态。人类对地热的开发利用破坏了这种动态平衡,最直观的表现即热储压力(水位)的变化(张森等,2020)。天津市位于华北盆地东北部,地下蕴藏着丰富的地热资源(茹洪久等,2018),地热开发始于20世纪30年代(田光辉等,2008),其中新近系地热流体于上世纪80年代开启规模化开发。90年代以后,地热开发向深部的基岩热储拓展(田光辉等,2016)。进入21世纪,地热开采总量持续走高,至2020年,天津市地热年开采量达到 $5\,382.44\times 10^4\text{ m}^3$,消耗量 $1\,710.75\times 10^4\text{ m}^3$ (张森等,2020)。由于地热的规模化开采,各热储层压力持续下降,水头从最初的自流状态下降至50~180 m不等。区域内形成了多个以集中开采区为中心向外围扩展的水位降落漏斗(张森等,2020)。

为了缓解热储压力,天津市地热管理部门在加强回灌的同时,于2018年至2019年间,陆续关停了

一批无采矿许可地热井和消耗性用途地热井,热储消耗量减小(宗振海等,2018a;高新智等,2019)。与此同时天津市各热储层漏斗中心区域水位相继出现了回升的现象,尤以冀中坳陷馆陶组漏斗区水位回升幅度之大,范围之广,该漏斗中心2020年最大回升幅度达20 m(张森等,2020)。而馆陶组热储是天津地热资源开发利用的主要热储层(杨吉龙等,2022;刘杰等,2023),也是十四五规划中重点利用储层之一,水位回升是否意味着储量的增加?限制开采区的地热是否可以再利用,如何利用?目前缺乏相关研究。本文通过分析冀中坳陷区馆陶组水位降落漏斗2016—2020年地热资源采灌量与水位动态之间的相关关系,研究漏斗形态演化特征,探讨漏斗区水位回升的根本原因,为热储开采量评价提供科学依据。

1 研究区概况

天津处在华北板块的北缘,二级构造单元纵跨

了燕山褶皱带和渤海湾盆地(李三忠等,2010;李俊建等,2010;何登发等,2017)。宁河-宝坻断裂以南为华北断坳区,横跨了3个Ⅳ级构造单元—西侧的冀中坳陷、中部的沧县隆起和东侧的黄骅坳陷,形成了两坳夹一隆的构造格局(图1)。区内广泛分布新近系馆陶组热储(陈勇等,2023)。馆陶组热储属孔隙型热储,伏于明化镇组热储之下。从构造格局上分析,天津地区在构造高凸起地区即双窑凸起的核部缺失了新近系馆陶组,总分布面积8 603.09 km²(天津市地质矿产局,1992;赵苏民等,2013;曾梅香等,2017),热储分布范围见图2。天津地区馆陶组热储以缺失带为界分为东西两区:西区以冀中坳陷、大城凸起为主体,行政区域主要包括武清、西青、静海等地;东区以黄骅坳陷为主体,行政区域包括滨海新区、东丽、津南等地(图2)。

缺失带两侧因沉积环境不同,形成两套完全不同的馆陶组热储系统:西区馆陶组热储,以武清区及北部为沉积中心,流体处于深循环的地质环境,为河流冲、洪积相沉积,渗透系数较小(0.23~0.74 m/d),侧向径流缓慢;东区馆陶组热储,受沉积环境控制形成深部静水压力系统,河、湖交替相堆积,渗透系数明显大于西区(1.71~2.18 m/d),侧向补给条件相对较好(张森等,2020)。热储接受山区大气降水补给,通过深大断裂流入热储层,在长距离的缓慢径流过程中充分吸收深部热源提供的热量形成地热水(赵子锐等,2023)。

本文所用地热采灌量及水位监测数据来自天

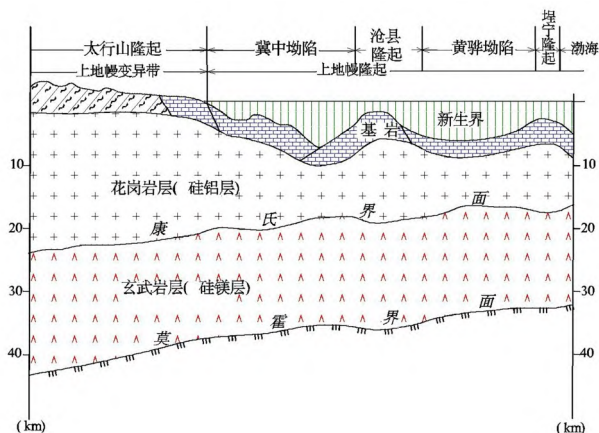


图1 华北地壳结构示意图(陈勇等,2023)

Fig.1 Schematic diagram of crustal structure in North China (Chen Yong et al,2023)

津地热勘查开发设计院历年动态监测数据,使用的水位数据均为每年度9—10月份监测数据。

2 开发利用现状

截止2020年底,天津市共有地热开采井343眼,回灌井204眼(岳冬冬等,2023),其中馆陶组地热井共有247眼,包括回灌井76眼(张森等,2020)。馆陶组地热井分布在冀中坳陷和黄骅坳陷(王冰等,2023),已开展了多年地热采灌工作(殷肖肖等,2024)。地热流体的开采大致经历了三个阶段,2001年之前,为缓慢增长阶段;2002—2010年,为稳定开采阶段,开采量维持在 $600 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a} \sim 900 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;2011—2020年,为急速增长阶段,开采量快速增加,此阶段内,回灌工作也取得一定成效,回灌量逐年提高,其中2020年度消耗量有明显降低(图3)。

天津市馆陶组热储集中开采区有四处(图2),其中两处位于武清区,两处位于滨海新区塘沽。两个分区单元于2016—2020年采灌量见表1(刘杰等,2020)。其中东区近5年消耗量相对稳定,不作为本次研究重点,而西区由于武清区政府加强了地热井监管力度,于2019—2020年间,陆续取缔了大量消耗性用途地热井,关停了一些非法开采无证井,消耗量大幅减少,2020年消耗量同比减少 $1\,382.82 \times 10^4 \text{ m}^3$,降幅高达76.8%。

3 水位空间分布及漏斗演化特征

3.1 水位空间分布特征

受武清、塘沽等地多年集中开采影响,馆陶组热储东西两区均形成了波及全区范围的水位降落漏斗。西区降落漏斗,以武清城区为漏斗中心,2020年最大静水位埋深达124 m,自漏斗中心向四周水位埋深逐渐变浅,最南部J-6井2020年水位埋深66.45 m,北部W-5井水位埋深66.95 m;漏斗中心地带等水头线密集,与集中开采区基本重合,漏斗边缘相对稀疏。东区水位降落漏斗中心为津南先锋村—辛庄镇一带,2020年最大静水位埋深达141.3 m,由漏斗中心向南北两侧静水位埋深逐渐变浅,与集中开采区分布位置有一定偏离(图2)。

3.2 漏斗形态演化特征

馆陶组热储2016—2020年间漏斗形态变化较

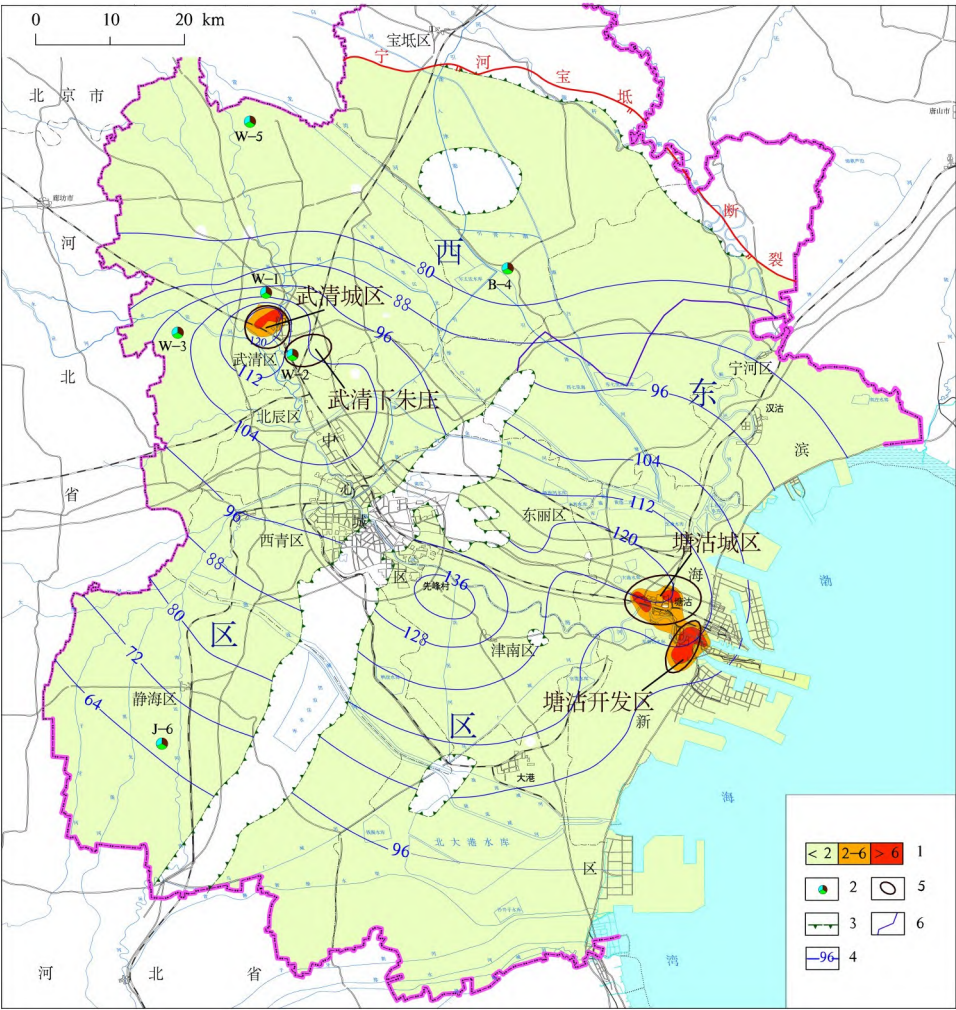


图2 馆陶组热储分布范围

Fig.2 Distribution of Guantao geothermal reservoir in Tianjin

1. 热储分布范围及消耗强度($10^4\text{ m}^3/\text{a}\cdot\text{km}^2$); 2. 地热井; 3. 馆陶组缺失线;
4. 水位埋深等值线(m, 2020年10月); 5. 集中开采区; 6. 漏斗分区界线

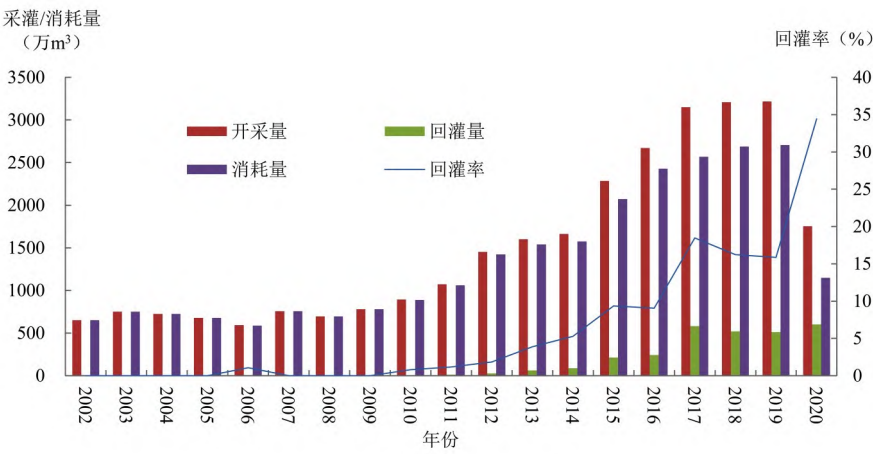


图3 新近系馆陶组热储层历年开采情况统计图

Fig.3 Statistical map of mining volume in Neogene Guantao Formation

表 1 新近系馆陶组热储采灌量分区统计表 (× 10⁴ m³)
Table 1 Divisional statistical of production and irrigation amount for Neogene Guantao Formation (× 10⁴ m³)

年份	分区单元	集中开采区	开采量	回灌量	消耗量	回灌率
2016	东区	塘沽城区、塘沽开采区	1 129.71	226.40	903.31	20.04
2017			1 190.10	379.69	810.41	31.90
2018			1 108.95	258.56	850.39	23.32
2019			1 181.06	274.76	906.30	23.26
2020			1 082.37	350.58	731.79	32.39
2016	西区	武清城区、武清下朱庄	1 541.17	15.07	1 526.10	0.98
2017			1 959.40	201.81	1 757.59	10.30
2018			2 100.06	262.07	1 837.99	12.48
2019			2 035.60	235.20	1 800.40	11.55
2020			670.16	252.58	417.58	37.69

大,漏斗中心水位埋深不断加大,且沿缺失带展布方向迅速向南北两侧外围区扩展。对各年度水位埋深等值线圈闭的漏斗区面积进行对比统计(表 2),结果表明,2016—2018 年间,漏斗中心区域水位埋深迅速增加,2017 年 108 m 水位埋深等值线圈闭的漏斗面积为 57 km²,到 2018 年增加了近三倍,漏斗中心位置从武清城区扩展到相邻的北辰区西北部;2019 年,漏斗范围仍有较大扩展,但漏斗形态有了较大变化,漏斗中心由东南部转向西南部,结合采灌情况可知,此时武清区采灌强度有剧烈调整,局部地区水位回升,漏斗呈现不稳定状态;2020 年,漏斗中心急剧萎缩,120 水位埋深等值线圈闭的漏斗面积由 2019 年的 72 km²降至 2020 年的 20 km²,此时漏斗中心区域水位全面回升,回升范围扩展至武清、北辰全区以及西青等地,在距离漏斗中心更远的静海等外围区水位仍呈下降趋势。

3.2 观测孔水位动态

为进一步说明整个西区馆陶组水位时空动态变化,选取漏斗区域内不同位置的馆陶组地热观测

表 2 馆陶组热储西区水位降落漏斗要素表
Table 2 Elements for groundwater depression cones in west area

时间	水位埋深等值线/m	圈闭漏斗区面积/km ²	漏斗中心位置
2016	104	12	武清城区
2017	108	57	武清城区及其东南部下朱庄地区
2018	108	192	武清东南部及北辰西北部
2018	116	39	武清城区及其东南部下朱庄地区
2019	116	105	武清城区及其西南部
2019	120	72	武清城区及外缘
2020	120	20	武清城区

孔,进行水位历时动态分析(表 3、图 4)。

对图 4 中各观测孔水位历年动态变化情况进行分析,可以发现以下几个现象:

(1)自观测时间始,所有井水位保持了逐年持续下降的态势;但 2019—2020 年间,距离漏斗中心地带较近的井(W-1、W-2、W-3、W-5),水位均呈现了由下降到回升的趋势,其中 W-2 井在 2018 就已经出现回升;远离漏斗中心的地热井(B-4、J-6),水位仍在下降,但年降幅减缓。

(2)未开采地热的闲置井,无论距离漏斗中心远近,水位动态与附近的生产井几乎保持一致,如尚未投入使用的 W-1 井和 W-2 井。

(3)生产井本身的采灌量与其水位动态变化无明显相关性,如 W-2 和 W-3 井,2020 年开采量同比均增长,水位却均回升。但水位变化趋势与整个西区 2016—2020 年馆陶组热储消耗量呈正相关,2018 年之前,随着消耗量增加水位埋深加大,2018 年之后,随着消耗量减少降幅减缓或水位回升(图 5)。

(4)地下热水水位变幅大小与距离水位降落漏斗中心的距离成反比,距离漏斗中心越近,地热井水位回升幅度越大(樊秀峰等,2005),最近的 W-1 井 2020 年水位回升 8.67 m,其次是 W-2 和 W-3 井,2020 年水位分别回升 6.91 m、4.63 m。而距离最远的 J-6 井,水位未回升,只是降幅减缓。

4 讨论

4.1 地热集中开采形成了水位降落漏斗

馆陶组热储为孔隙型承压含水层,在天津地区凹陷区内广泛分布,平面区域连通性较好,热储顶底板为隔水层或弱透水层,流体主要靠侧向径流补给。热储边界除缺失线不能给水外,其余边界在天津市辖区内均为开放式自然流量边界,为地热流体的侧向补给提供了良好通道(刘杰等,2020)。

表 3 馆陶组地热观测孔基本要素表
Table 3 Basic elements of geothermal observation holes in Guantao Formation

井编号	井深/m	行政区	距漏斗中心点/km	用途
W-1	2 480	武清区	3.8	供暖生产井
W-2	1 906	武清区	5.8	供暖生产井
W-3	2 521	武清区	12.0	闲置井
W-5	2 180	武清区	26.9	生活用水生产井
B-4	1 700	宝坻区	32.9	闲置井
J-6	1 400	静海区	58.3	闲置井

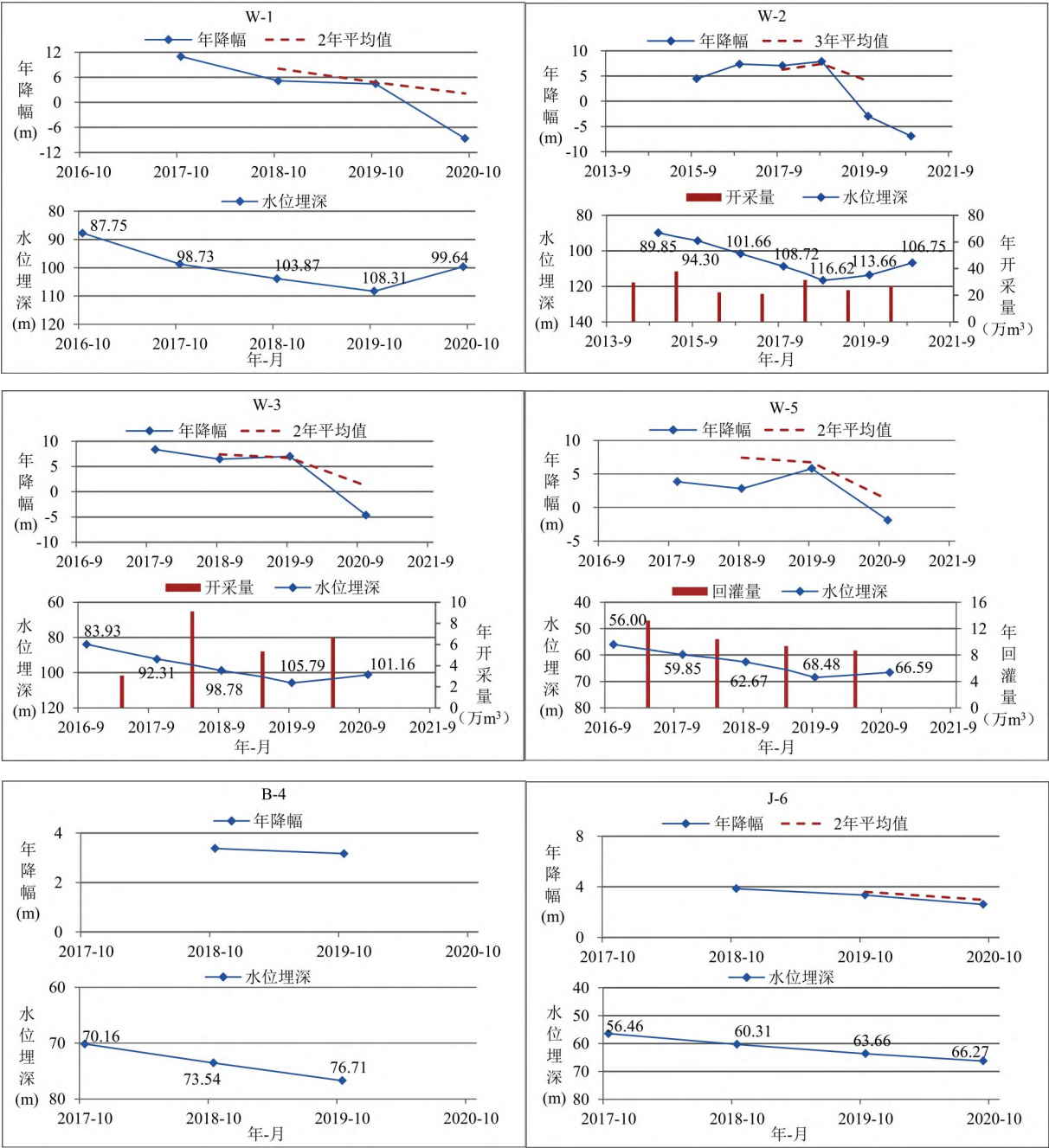


图4 西区馆陶组观测孔水位历时折线图

Fig.4 Water level diachronic line chart of Guantao Formation observation hole in West Area

承压含水层的采出水,若达不到及时有效的补给,必然伴随着热储压力下降(张念龙等,2001;李亚松等,2013)。地热开采初期,由于开采规模不大,热储层弹性释水量基本能够满足开采需求,水位下降缓慢;随着开采规模的扩大,在集中开采区开采量过大,补给量不能满足采出量,热储压力始终处于“入不敷出”的状态,水位以集中开采区中心

为峰值带动周围区域持续下降,于是形成了水位降落漏斗,并且随着开采规模的持续增长不断扩张。

4.2 群井抽水叠加效应导致热储压力同步波动

评价单井可采量时,往往采用大落程抽水时似稳定状态的影响半径进行水文地质参数计算,以此得出可开采量。实际生产中,地热井大量集中开采时,影响半径相互干扰和叠加(魏忠成等,2017),导

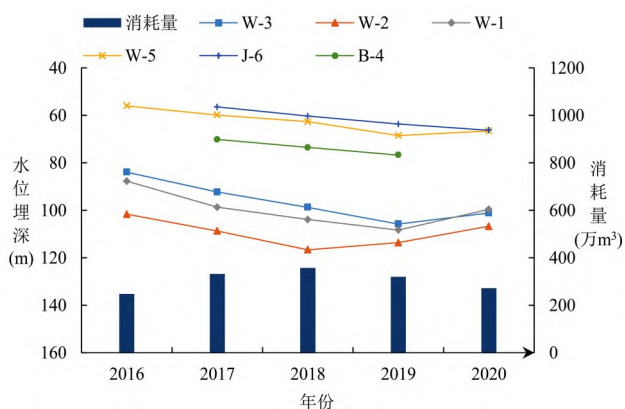


图5 代表性观测孔水位与西区消耗量变化相关关系

Fig.5 Correlation between water level of representative observation holes and consumption change in western area

致实际影响半径延伸至更远的补给区(薛禹群等, 2005; 杨丽芝等, 2009)。而井本身开采引起的年降幅与水位动态相关性变差, 水位动态更侧重反应区域开采的影响, 这个区域范围随着集中开采规模扩大而增大。通过图3中相关数据分析可知, 集中区开采影响半径已扩展至整个西区, 与该区内采灌量变化呈一致相关性。

4.3 消耗量骤减和漏斗的夷平作用使得漏斗中心区域水位回升

在集中开采区开采量持续扩张的状态下, 水位降落漏斗范围不断向纵深和外围发展(宗振海等, 2018b), 同时造成漏斗中心区域和漏斗外围较大的水头差, 由外围向中心区域的径流补给量也相应增加。表现为漏斗外围区无开采或少量开采, 水位却始终在下降, 2020年度缺失带东西两侧漏斗中心与外围最大水位降差分别达到47 m和64 m, 地热流体由外围区向漏斗中心低水位区汇流(张森等, 2020)。当漏斗中心区域消耗量减少到一定程度时, 补给量会大于消耗量, 热储进入储水状态。这时, 热储压力开始恢复, 漏斗中心区域水位出现回升, 发生了漏斗的夷平作用(张念龙等, 2001)。

实际上, “夷平作用”贯穿地热漏斗从形成到结束的全过程, 它的本质是水头压差作用导致的压力场中“削峰填谷”, 最终趋向于压力平衡。只是在漏斗扩展阶段, “夷平作用”补给的水量被完全采出, 而漏斗萎缩阶段, “夷平作用”补给的水量开始存储。

4.4 可采量评价应以水位实时动态变化为基准

漏斗外围区对中心区域的补给量是一个动态变化的过程, 随着漏斗中心区域压力恢复, 外围的补给量也相应减少。2019年馆陶组西区总消耗量 $1\,800.40 \times 10^4 \text{ m}^3$, 加权水位降幅3.28 m(张森等, 2020), 热储压力总体仍处于消耗状态; 2020年总消耗量降至 $417.58 \times 10^4 \text{ m}^3$, 加权水位升幅1.45 m(张森等, 2020), 此时热储总体来说处于储水状态。采用一次线性方程计算水位加权降幅为0时即可求得热储补给量 $841.49 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 这个量是以2019—2020年现状水力条件和采灌强度进行计算的, 是现阶段漏斗从外围区获得的补给量, 但它不是稳定的, 会随着漏斗形态变化而变化。但可作为现阶段热储可采量评价的重要参数, 若消耗量超过这个值, 理论上水位会继续下降。

漏斗区若能维持补给量和开采量的收支平衡, 水位将会相对稳定在既有状态。但馆陶组热储回灌困难, 现阶段开发利用很难实现收支平衡(宗振海等, 2016; 宗振海等, 2017), 当夷平作用减弱后, 持续开采条件下热储压力会开始新阶段埋深更大的漏斗形成和扩张。

降落漏斗在一定程度上促进了地下水的径流补给, 由于疏干了特定区域内的地下水, 增加了蓄水空间, 可截取更多的地下水迳流量(陈宇良等, 2007), 甚至对人工回灌也有一定的助益, 但其危害也不容忽视, 对孔隙型热储来说, 漏斗的长期存在可能会使储层结构变形(李亚松等, 2013), 越流补给加大, 水质也容易受到上层地下水的影响。因此, 地热评价和管理应以漏斗区域内热储压力的动态变化为基准, 合理控制漏斗区域的消耗量, 维持漏斗区域的水量收支动态平衡, 保护热储压力, 是馆陶组地热资源持续利用的有效途径。

5 结论

(1) 天津地区馆陶组为孔隙型层状热储, 平面联通性好, 为统一的水动力场系统。局部地区集中开采形成压力降落漏斗, 流场形态为外围向漏斗中心径流。2020年武清区馆陶组热储漏斗中心20 m的水位升幅主要是热储补给量超过年度消耗量所致, 即漏斗的夷平作用。整个热储的储量并没有增

加,消耗量存在,资源总量仍会减少。

(2)夷平作用产生的补给量不稳定。采用一次线性方程,计算2019—2020年馆陶组西区获得补给量为 $841.49 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,后期会随着水头差的降低而减少。

(3)作为可再生能源的重要组成部分,地热资源对于未来我国实行节能减排及双碳目标具有重要意义(王贵玲等,2023)。进行地热开采规划、可采量评价应以漏斗区域内热储压力的实时动态为基准,保证最佳采灌比,维持整个热储或水文地质单元的水量收支动态平衡,保护热储压力。

(4)对于集中开采区而言,其地热水的开采资源量不仅仅来自热储层的弹性释水量,更大的资源量是来自侧向补给量、越流补给量和弱透水层的压密释水量(苏永强等,2021)。本次研究主要分析馆陶组局部地区资源量的增减总量,对于完整的水文地质单元的资源量构成,需要从系统思想出发(王贵玲等,2020),做进一步的研究。

中文参考文献

- 陈勇,张云霞,徐连和,等.2023.天津市地热资源勘查开发利用战略研究[M].北京:中国地质出版社.
- 陈宇良,都基众.2007.地下水降落漏斗的形成与控制[J].工程勘察,(6):23-26.
- 樊秀峰,吴振祥,简文彬.2005.福州温泉区地下水热水开采时空分布特征分析[J].水资源保护,21(6):37-40.
- 高新智,蔡芸,张森,等.2019.2019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.
- 何登发,崔永谦,张煜颖,等.2017.渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型[J].岩石学报,33(04):1338-1356.
- 李俊建,罗镇宽,燕长海,等.2010.华北陆块的构造格局及其演化[J].地质找矿论丛,25(02):89-100.
- 李三忠,索艳慧,戴黎明,等.2010.渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J].地学前缘,17(04):64-89.
- 李亚松,费宇红,钱永,等.2013.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,27(1):181-184.
- 刘杰,刘斐,赵苏民,等.2020.天津市地热资源潜力评价[R].天津:天津地热勘查开发设计院.
- 刘杰,宋美钰,胥博文,等.2023.天津市馆陶组地热流体可采量计算方法及适宜性分区研究[J].中国地质,50(6):1655-1666.
- 茹洪久,刘东林,胡慧川,等.2018.天津地热资源评价与综合研究[J].中国地质调查,5(2):25-31.
- 苏永强.2021.开采状态下河北平原孔隙热储地热水资源的构成——以辛集集中开采区为例[J].中国地质调查,8(5):10-17.
- 天津市地质矿产局.1992.天津市区域地质志[M].北京:中国地质出版社.
- 田光辉,蔡芸,刘东林,等.2016.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:天津地热勘查开发设计院.
- 田光辉,曾梅香,阮传侠.2008.天津地热资源开发利用动态特征浅析[J].地下水,30(5):28-31.
- 王冰,宗振海,夏雨波,等.2023.天津地区地热流体主要离子组分特征及地热成因分析[J].华北地质,46(2):10-16.
- 王贵玲,蒯文静,刘峰,等.2023.地热系统深部热能聚敛理论及勘查实践[J].地质学报,97(3):639-660.
- 王贵玲,蒯文静.2020.我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J].地质学报,94(7):1923-1937.
- 魏忠成,高薇,尹华.2017.基于回归分析方法的四平市地下水可开采量研究[J].水电能源科学,35(12):18-21.
- 薛禹群.2005.地下水动力学[M].北京:地质出版社.
- 杨吉龙,汪大明,牛文超,等.2022.天津地热资源开发利用前景及存在问题[J].华北地质,45(03):1-6.
- 杨丽芝.2009.德州深层地下水位降落漏斗演变机制与可调控性研究[D].中国地质科学院.
- 殷肖肖,赵苏民,蔡芸,等.2024.近三十年天津市地热大规模开发热储动态特征研究[J].地质学报,98(1):297-313.
- 岳冬冬,贾小丰,张秋霞,等.2023.天津山岭子地热田蓟县系雾迷山组热储流体同位素特征及其指示意义[J].华北地质,46(2):45-50.
- 张念龙,张希中.2001.地下水位降落漏斗的形成及夷平作用[J].地下水,23(2):76-77.
- 张森,高新智,蔡芸,等.2020.2020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.
- 赵苏民,孙宝成,林黎,等.2013.沉积盆地型地热田勘查开发与利用[M].北京:地质出版社.
- 赵子锐,张薇,王贵玲,等.2023.冀中坳陷高阳地热田水文地球化学特征及其对地热成因的约束[J].中国地质网络首发论文,ISSN 1000-3657,CN 11-1167/P.
- 宗振海,高新智,蔡芸,等.2016.2016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.
- 宗振海,高新智,蔡芸,等.2017.2017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.
- 宗振海,高新智,蔡芸,等.2018a.2018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.
- 宗振海,闫佳贤,殷肖肖,等.2018b.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[J].地质调查与研究,41(4):312-317.
- 曾梅香,赵苏民,候福志,等.2017.天津地热(温泉)志[M].天津:天津科学技术出版社.