

# 地热资源大规模采灌动态响应规律与演化趋势 ——以德州地热田为例

康凤新<sup>1,4</sup>, 刘帅<sup>\*2,3,5,6</sup>, 闫燕<sup>2</sup>, 李嘉龙<sup>1,4</sup>, 白通<sup>2</sup>, 冯颖<sup>2</sup>, 张航星<sup>2</sup>, 陈京鹏<sup>2</sup>, 杨亚宾<sup>2</sup>, 刘毅<sup>2</sup>

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛, 266590;
2. 山东省地质矿产勘查开发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), 山东德州, 253072;
3. 北京师范大学水科学研究院, 北京, 100875;
4. 山东省地热清洁能源重点实验室, 山东济宁, 272100;
5. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 山东德州, 253072;
6. 德州市深层地质能节能减碳重点实验室, 山东德州, 253072

**摘要:** 德州市是我国地热资源开发利用较早地区之一, 经过多年大规模持续性开采, 是否引发了资源枯竭、水质恶化以及热储温度下降等地质环境问题, 一直是社会关注的焦点。本文基于 1997 年以来德州地热田馆陶组、东营组、寒武-奥陶系热储开发利用历史及水位、水量、水质、水温、热储温度等长序列动态监测资料, 通过时空对比, 分析总结热储动态演化特征。结果表明, 回灌前的大规模开发造成了地热水位快速下降; 随着回灌率不断增加, 大部分开采井水位下降趋势明显减缓, 甚至部分地热井水位止跌回升。多年的开采、回灌没有对水质造成较大影响, 地热水各主要离子含量基本稳定, 开采井井口水温保持动态稳定。随着回灌年度的不断增加, 回灌井热储含水层段垂向温度变化幅度越来越小, 温度恢复速率越来越慢, 呈指数级衰减, 指示规模化回灌条件下, 回灌井周围“冷堆积”现象应是制约地热资源采灌均衡可持续循环开发的主要制约因素。

**关键词:** 大规模采灌; 动力场; 化学场; 温度场; 德州地热田

**中图分类号:** P314

**收稿日期:** 2025-05-15

## Dynamic response and evolution trend on large-scale production and reinjection of geothermal resources: a case study of Dezhou geothermal field

KANG Fengxin<sup>1,4</sup>, LIU Shuai<sup>\*2,3,5,6</sup>, YAN Yan<sup>2</sup>, LI Jialong<sup>1,4</sup>, BAI Tong<sup>2</sup>, FENG Ying<sup>2</sup>, ZHANG Hangxing<sup>2</sup>, CHEN Jingpeng<sup>2</sup>, YANG Yabin<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590;

2. The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Lubei Geo-engineering Exploration Institute of Shandong Province), Dezhou, Shandong, 253072;

3. Institute of Water Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875.

4. Shandong Key Laboratory of Geothermal Clean Energy, Jining 272100, China

5. Shandong Provincial Research Center of Geothermal Resources and Reinjection, Dezhou, Shandong, 253072;

6. Dezhou Deep Geological Energy Conservation and Carbon Reduction Key Laboratory, Dezhou, Shandong, 253072;

基金项目: 泰山学者工程专项经费(NO. tstp20230626)和国家自然科学基金项目(编号 42072331, U1906209)。

作者简介: 康凤新 (1968-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水文地质地地质研究工作。E-mail: kangfengxin@126.com。

\*通讯作者: 刘帅, E-mail: vileesy@126.com。

**Abstract:** Dezhou City is one of the earliest areas for the development and utilization of geothermal resources in China. After years of large-scale continuous development, whether it has caused geological environmental problems such as resource depletion, water quality deterioration and reservoir temperature decline has always been the focus of social attention. In this paper, the long sequence monitoring data of Guantao Formation, Dongying Formation and Cambrian-Ordovician reservoir development and utilization history and current situation, water level, water quantity, water quality, water temperature and reservoir temperature in the process of geothermal development in Dezhou City since 1997 are systematically collected. Based on the spatiotemporal variation of the key characteristics of the geothermal reservoir, the dynamic evolution characteristics of reservoir are analyzed and summarized. The results show that the large-scale development before recharge has caused a rapid decline in geothermal water level. With the continuous increase of recharge work, the downward trend of water level in most development wells has slowed down, and even some geothermal wells have rebounded; Years of exploitation and recharge have not had a great impact on water quality, and the main ion content of geothermal water is basically stable; The wellhead water temperature of the development well has not changed due to years of development; With the increase of the recharge year, the vertical variation of the reservoir section of the recharge well is getting smaller and smaller, and the temperature recovery rate is getting slower and slower. Under the condition of large-scale recharge, the phenomenon of 'cold accumulation' in recharge wells should be the focus of attention.

**Keywords:** large-scale production and reinjection; hydrodynamic field; hydrochemical field; temperature field; Dezhou geothermal field

## 0 引言

地热是一种清洁低碳、分布广泛、储量丰富、安全稳定的优质可再生能源，是在可以预见的未来时间能够被人类经济开发和利用的地球内部热能资源（王贵玲等，2020；Lin Wenjing et al., 2021；Kang Fengxin et al., 2021；Fengxin Kang et al., 2022；康凤新等，2023）。德州是我国地热大规模开发利用最早的城市之一。20 世纪 90 年代起，德州开始开发地热资源，目前地热供暖规模已达 1400 万  $\text{m}^2$ 。同时，德州也是我国开展地热回灌最早的地区之一，截至 2023 年底，德州市热储总体回灌率已达到 80% 以上，开发利用总量、配套回灌设施及规范管理水平均居全国前列。持续开采及大规模回灌条件下热储层水位、水温、水质动态响应规律及演化趋势，以及是否影响地热资源可持续开发利用已成为业内关注的焦点。

王彦俊等（2005）总结了德州市主要热储特征、地热水资源补给条件，分析了 2004 年地热开发利用情况，提出了地热开发与保护对策。周世海等（2007）以德州市为例，分析了地热回灌对水质、水量、水温的影响，证实了回灌井结构、热储特征、回灌压力、回灌工艺等是影响回灌效果的主要因素，明确了地热回灌量与出水量、回灌压力之间的关系，提出回灌可以有效解决地热开发利用带来的诸多问题。杨询昌等（2011）对区内馆陶组热储多年地热水动态与开采量进行分析研究，查明了区内地热水动态与开采量的相互关系，建立了区内地热水动态与开采量相关方程，并通过方程曲线态势分析，提出了区内地热集中开采区馆陶组热储地热水预警开采量，为区内地热资源的可持续开发利用提供了科学依据。刘志涛等（2019）通过对德州水文家园砂岩热储地热回灌井全井段温度监测，在深度上分为 5 个区段论述了地温场的变化特征，重点对热储地温恢复的热量来源进行了分析。刘帅等（2021）根据不同地区、不同热储层全井段测温结果，对砂岩热储不同采灌工程地温场变化特征进行了分析，发现随着回灌年数的增加，冷水范围越来越大，热对流对

温度场恢复的作用逐渐减弱，周边和相邻隔水层热传导在温度恢复中的作用越来越显著，温度恢复越来越慢。殷肖肖等（2024）总结了天津市地热大规模开发热储动态特征，发现天津市各热储层地热流体的主要化学组分基本稳定，多年来无明显变化，地热采灌系统尾水回灌不会从根本上改变地热流体的原始化学特征；随着近年来天津市回灌工作力度不断加大，大部分热储水位下降幅度减缓或出现回升，热储的温度没有明显的升高或降低趋势，但回灌井热储段经过非供暖期的恢复无法达到最初的温度，呈逐年下降趋势。

本文系统梳理了 1997 年以来德州市地热开发利用过程中不同热储层开采量、回灌量、水位、水质、水温等 27 年长序列动态监测数据，对德州市不同地区不同热储层的地热水动态特征进行时空对比，分析长期持续开采及大规模回灌条件下热储层水位、水温、水质、采灌量动态响应规律及演化趋势，为德州市地热资源的大规模可持续开发利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 地质背景

研究区是在华北地台基础上发展起来的中新生代断陷盆地（刘桂仪等，2000；颜世强等，2001；段晓飞等，2023），在大地构造单元上属于华北板块（I 级）的华北拗陷区（II 级）。自太古代以来，本区经历了多次构造运动，对其前期的构造格局和盖层都有不同程度的改造，尤其是燕山运动对区内现今构造格局的形成起了决定性作用（牟林凯，2018），不仅对其前期地层产生褶皱，发育了一系列 NNE、NEE、NWW 向继承性深大断裂（牛首泽，2022），并伴随有岩浆活动，而且使华北拗陷与鲁西地块发生了变化脱节解体，出现以侏罗系和白垩系为主的盆地碎屑岩沉积，从而奠定了本区地质结构的雏形。中新生代以来，受燕山运动和喜马拉雅运动的影响，断裂构造持续发育，形成凸凹相间的 III 级构造单元济阳拗陷（III 级）、临清拗陷（III 级）（刘桂仪，2001；颜世强等，2007；王彦俊等，2008；赵季初，2013），并在断裂控制下，发育形成了众多的次级构造单元——凸起与凹陷（图 1）。

### 1.2 热储特征

区内地热资源的赋存与分布受地质构造及地层岩性控制。凸凹不平的基底构造格局，对该区地热资源分布具有重要影响。一般来说，在新生界盖层一定深度范围内，正向构造的地温高，地温梯度大；负向构造的地温低，地温梯度小；地壳浅部地温分布与基岩面起伏呈正相关。其次，地层中孔隙、裂隙或溶隙的普遍存在是地热资源形成与赋存的必备条件。在区内第四系之下，是多层结构的含水岩组。其中，新近系、古近系裂隙孔隙含水岩组，岩石颗粒粗、孔隙大、分布广，为地热水赋存提供了良好的储存空间（刘桂仪等，2001）。

德州市热储有上部的新近系馆陶组和古近系东营组碎屑岩层状裂隙孔隙热储，以及深部的寒武—奥陶系碳酸盐岩岩溶裂隙热储；其中新近系馆陶组砂岩裂隙孔隙热储为德州市主要热储层（颜世强等，2001；王彦俊等，2005），热储特征见表 1。



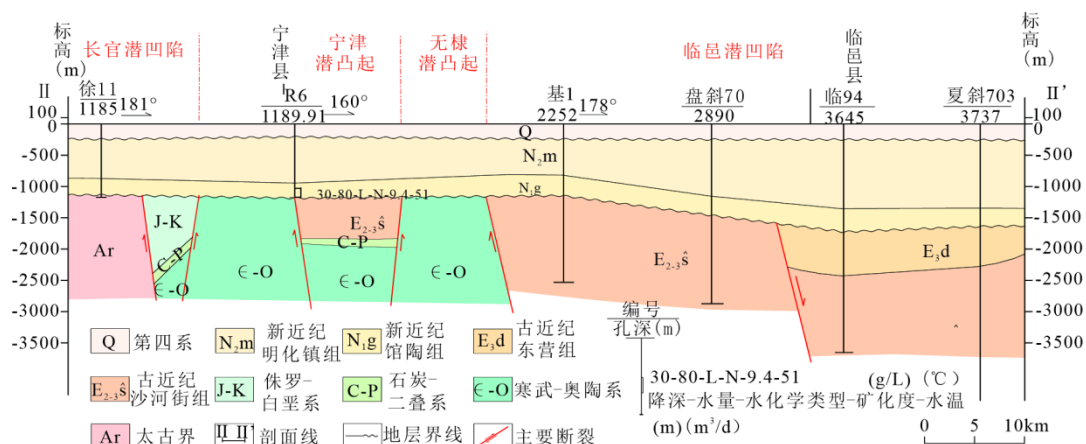


图 3 II-II' 地热地质剖面图  
Fig. 3 II-II' geothermal geological profile

表 1 德州市主要热储特征一览表  
Table 1 List of main reservoir characteristics in Dezhou City

热储名称	分布特征	井口水温(℃)	矿化度(g/L)	单井涌水量(m <sup>3</sup> /d)	水化学类型
馆陶组砂岩热储	除在南部山前边缘地带部分缺失外，其余地区皆有分布；受区域构造和基底起伏的控制，其总的分布规律在凸起区埋藏浅、厚度薄，凹陷区埋藏深、厚度大	45~65	6~10	70~120	Cl-Na
东营组砂岩热储	主要分布在临清坳陷的武城-夏津、德州-陵城-平原一线以及济阳坳陷的禹城、临邑等地，其余地区缺失	60~70	10~15	30~60	Cl-Na、Cl-SO <sub>4</sub> -Na
寒武-奥陶系碳酸盐岩热储	主要分布在宁津、故城-武城、高唐、孤岛、桩西等潜凸起区	60~128	1.5~16	50~170	从山前平原的HCO <sub>3</sub> -Ca·Na型逐渐过渡到海滨潜凸起的Cl-Na型

## 2 动态监测数据

德州市从 1997 年开始进行地热水动态监测工作，经过 26 年的不断完善、改进，建立起较为系统的动态监测体系。通过多年来连续的热储动态数据积累，为德州市地热勘查开发利用及其管理信息系统的完善提供了科学依据。根据德州市不同热储层监测情况，大致将德州市地热动态监测工作划分为三个阶段：初期阶段（1997~2013 年），此期间地热井监测主要服务于地热资源勘查工作，以人工监测为主，重点监测水位动态和流体化学动态。长期监测阶段（2014~2018 年），2014 年以来，为掌握地热水长期动态变化规律和演化趋势，布设长期监测孔，监测方法和手段也不断提高，从人工监测到远程自动化智能监测与人工监测相结合；到 2018 年，长期监测井数达到 25 眼。系统化监测阶段（2019 年至今），此阶段建设了地热资源监测系统，涵盖区内所有地热井监测数据，自动化监测程度不断提高，监测工作进入系统化监测阶段。



截至 2023 年 12 月纳入监测的地热井共有 651 眼，其中开采井 322 眼、回灌井 329 眼（图 1），基本涵盖了区内所有采灌井，监测内容包括水位、水质、水温、水量等。此外，还选择了重点采灌工程进行全井段井温监测，以监测大规模回灌条件下地温场的变化规律和热量恢复能力。水位监测以人工监测和自动监测相结合方式进行，人工监测采用测绳监测，误差小于 5cm/100m，至少每 10 天监测一次；自动监测采用压力式自动水位仪监测，测量精度大于±0.1%，每天监测一次。温度监测主要为供暖季井口水温监测，采用温度传感器自动监测，精度达到 0.1℃。水量监测采用电磁流量计自动化监测，数据传输至地热资源监测系统，测量精度为 0.01m³。水质监测为开展监测井全分析样品采集工作，样品采集严格按《地热资源地质勘查规范》（GB/T 11615-2010）规定执行，水质分析由山东省鲁北地质工程勘察院、山东省地质环境监测总站实验室完成。全井段井温监测采用仪器为山西中大电子科技有限公司生产的 ZDKJ-A1 型井下探测仪，测量精度为 0.1℃，由井口自上而下观测，至井底后自下而上复测，结果取两者平均值；热储段测点间距为 5m，盖层测点间距为 20m。

### 3 结果

#### 3.1 开发利用动态

德州市地热资源丰富，是山东省地热资源富集区之一，具有分布范围广、储量丰富、易于开采等特点。经初步估算，回灌条件下德州市地热水可采资源量为 932.30 万 m³/d，折合标准煤 1233.39 万 t/a，可供暖面积 59654 万 m²/a。德州市地热资源的开发利用始于 20 世纪 90 年代，1997 年 3 月，山东省地质矿产勘查开发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）成功钻凿了成井深度 1479.72m、取水层位为新近纪馆陶组热储层、井口水温 56℃的德州市第 1 眼地热井——位于水文家园的德热 1 井，用于小区供暖，从此揭开了德州市地热资源开发利用的序幕。1998 年，该院在德州市经济开发区钻凿了同层位第 2 眼地热井，并开展了地热资源综合利用研究，技术支撑建立了集地热供暖、洗浴、室内外游泳为一体的凯元温泉度假村，开创了山东省地热资源综合利用的先河。由于这两处地热资源的成功开发利用，地热资源所具有的清洁环保、供暖成本低、效益显著、稳定可靠等特点逐渐被社会认可，并迅速传播开来，带动了鲁北平原区地热开发热潮，各地城区陆续开凿地热井用于地热供暖。尤其是随着房地产市场行业快速发展，地热供暖规模逐年加大，遍布德州市所辖的市、县城区，2010 年后逐渐向乡镇及城市周边的农村社区扩展。

自 2006 年开始，持续开展地热回灌关键技术研究与技术攻关，突破了砂岩热储回灌易堵塞、回灌量急剧衰减等瓶颈难题，建立了回灌井钻探工艺、成井工艺、回灌工艺、维护保养工艺等技术体系。2016 年 7 月 6 日，在水文家园距德热 1 井 180m 处钻成成井深度 1536.44m、井口水温 57℃的大口径深井填砾回灌井——德热灌 1 井，与德热 1 开采井构成对井采灌系统（表 2），建成全省首个砂岩热储对井采灌示范工程，形成了“技术创新、示范引领、以灌定采、高效利用”的地热清洁供暖“德州模式”（图 4），为实现砂岩热储地热资源可持续开发利用提供了技术支撑。历经 26 年的发展，德州市地热井数量、开采量、回灌率、供暖面积都呈现持续增长趋势。

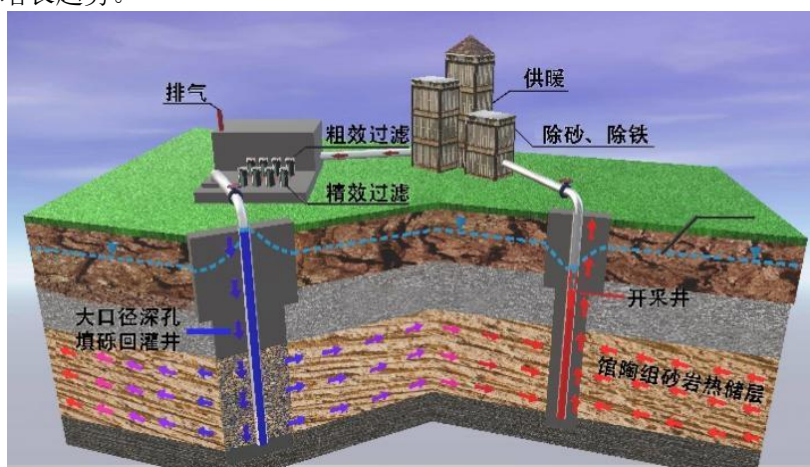


图 4 砂岩热储对井采灌系统  
Fig. 4 Sandstone georeservoir paired-well extraction and recharge system

表 2 采灌对井参数对比表  
Table 2 Comparison table of well parameters

项目	德热 1 开采井	德热灌 1 回灌井	备注
成井时间	1997 年 3 月 23 日	2016 年 8 月 6 日	
钻探/成井深度	1491.37m/1479.72m	1544.50m/1536.44m	
钻探成井结构	孔深 0~109.80m, $\Phi=450\text{mm}$ ; 孔深 109.80~212.66m, $\Phi=311\text{mm}$ ; 孔深 212.66m 以下, $\Phi=244.5\text{mm}$ ,	孔深 0~281.33m, $\Phi=610$ 孔深 293.50~1544.50m, $\Phi=450\text{mm}$	
下入管材	0~104.92m, $\Phi 339\text{mm}\times 8.94\text{mm}$ , 104.92~1479.72m, $\Phi 177.8\text{mm}\times 9.19\text{mm}$	-1~281.33m, $\Phi 339.7\text{mm}\times 9.65\text{mm}$ 281.96~1536.44m, $\Phi 177.8\text{mm}\times 8.05\text{mm}$ (J55 级)	石油 套管
成井方式	胶皮伞止水, 止水位置 286.35m, 1320.87m, 1330.71m, 1368.38m, 1449.14m, 1467.56m	大口径填砾粘土球止水, 填砾位置 1310.00~1544.50m, 砾料 43.0m <sup>3</sup> , 粘土球止水位置 1280.00~1310.00m, 粘土球 3.0m <sup>3</sup> , 上部投入粘土 57m <sup>3</sup>	回填 至井 口
最大涌水量/降 深/水温	100.37 m <sup>3</sup> /16.40m/55.5℃	92.24m <sup>3</sup> /14.38m/57℃	
滤水管位置	1335.6~1356.32m, 1376.29~ 1386.40m, 1396.55~1417.03m, 1428.28~1438.87, 1457.14~ 1467.56, 累计 72.32m	1343.4~1354.64m, 1366.40~ 1524.74m, 累计 169.58m	
取水层段/累计 厚度	1332.0~1464.0m/68m	1319.0~1525.0m/176m	

### 3.1.1 开采井数量变化

1997~2023 年德州市不同热储开采井数量变化情况见图 5, 德州市地热开发利用层位主要为新近纪馆陶组砂岩热储, 地热井数量占全市开采井数量的 90%以上, 其次为禹城部分地区的东营组和馆陶组混合热储, 以及齐河部分地区的寒武-奥陶纪碳酸盐岩裂隙岩溶层状热储, 开采时间较晚, 开采井数量较少, 两者合计不足全市开采井总数量的 10%。

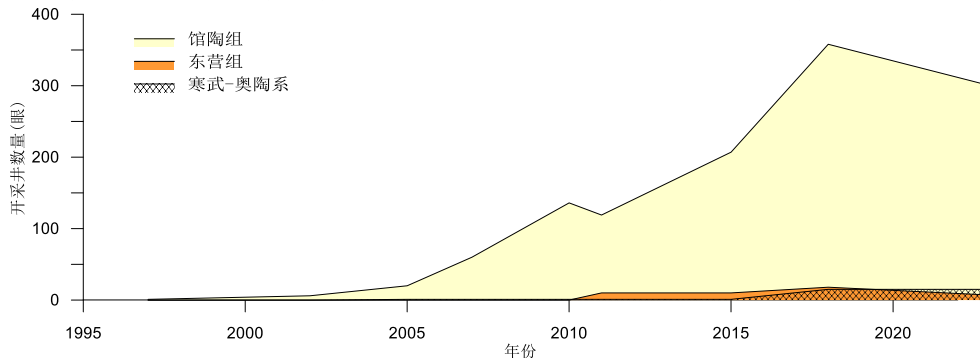


图 5 1997~2023 年德州市不同热储开采井数量变化图

Fig.5 Geothermal wells in different reservoirs in Dezhou City from 1997 to 2023

### 3.1.2 开采量动态

德州市地热开采量随着开采井数的增多而增大, 尤其 2010 年之后, 房地产业发展迅

速，带动了地热供暖规模化发展，地热开发规模、利用水平不断提高。2018 年地热资源开采量达到了 6047 万  $\text{m}^3/\text{a}$ ；2018 年以后，地热供暖尾水大规模回灌，未回灌或回灌效果差的地热井予以关闭，开采量下降、回灌量增加；2023 年底地热资源开采量约 4640 万  $\text{m}^3/\text{a}$ （图 6）。

按开采热储划分，2007 年之前，只开采新近纪馆陶组热储；2007 年开始开采寒武-奥陶系热储；2010 年禹城市开始利用东营组热储；目前德州市仍以馆陶组热储开发为主，占开发利用总量的 90%以上。

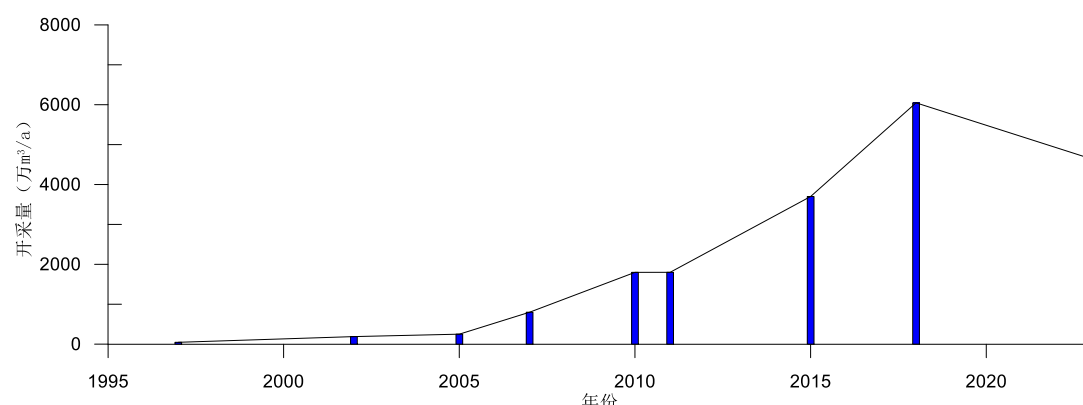


图 6 1997~2023 年德州市地热井开采量变化图

Fig. 6 Variation of geothermal well production in Dezhou City from 1997 to 2023

### 3.1.3 地热尾水回灌

德州市地热尾水回灌试验研究始自 2006 年（周世海等，2007），回灌层位为新近纪馆陶组；2016 年开始进行高矿化度的东营组热储回灌试验。2016 年建成了砂岩热储开发利用与回灌示范工程，逐渐探索形成了较成熟的回灌理论技术，编制了行业标准，为砂岩热储地热尾水回灌工作奠定了技术支撑。德州市地热尾水回灌工作大致可划分为以下五个阶段：

（1）探索试验阶段（2006~2012）：2006 年，德州市针对开发利用程度较高的新近纪馆陶组热储进行了对井回灌试验，按由小到大的顺序采用 4 个压力进行回灌，累计回灌时间 2176min，累计回灌量 426.4 $\text{m}^3$ ，平均稳定回灌量 11.4 $\text{m}^3/\text{h}$ （周世海等，2007），回灌困难。2010 年，进行了加压回灌试验，最大稳定回灌量 72.6 $\text{m}^3/\text{h}$ ，堵塞严重，无法维持长期稳定回灌。

（2）回灌量突破阶段（2012~2013）：2012 年，首次采用深井大口径填砾成井工艺施工回灌井；回灌井静水位埋深 30.69m、水位升幅 29m 时，自然无压回灌量 70 $\text{m}^3/\text{h}$ ，取得回灌量突破。

（3）生产性规范化回灌阶段（2013~2019）：采用深井大口径填砾成井工艺进行生产性回灌，回灌率达到了 80%以上；2016 年山东省地质矿产勘查开发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）在德州市德城区建成了对井采灌砂岩热储地热尾水回灌示范工程，形成了可推广、可复制的采灌工程样板。2016~2018 年，康凤新、周群道、赵苏民等在典型成功回灌试验案例的基础上，总结鲁北、天津、河北的经验做法，编制了国家地质矿产行业标准《砂岩热储地热尾水回灌技术规程》（康凤新等，2020），自然资源部 2019 年发布实施，砂岩热储地热尾水回灌技术得以标准化推广应用。2018 年，山东省国土资源厅、山东省水利厅联合印发《关于切实加强地热资源保护和开发利用管理的通知》，提出要落实以灌定采措施，确保回灌质量。开采孔隙热储型地热资源的回灌率不低于 80%，开采岩溶热储型地热资源的回灌率不低于 90%。

（4）规模化回灌阶段（2019~2022）：全市大规模施工地热回灌井，至 2022 年，回灌井数量已和开采井持平，地热供暖工程均采用“以灌定采、同层等量回灌、采灌均衡”模式，回灌率均在 90%以上，实现地热资源的可持续、循环开发利用。

（5）采灌均衡推广阶段（2022 至今）：在总结大规模回灌工程成熟理论技术的基础上，康凤新、周群道等（2023）编制出版了适用于我国北方主力供暖热储——砂岩热储和碳酸盐岩热储的国家能源行业标准《水热型地热尾水回灌技术规程》；康凤新、赵季初等



（2022）撰写出版了专著《砂岩热储工程技术与应用》，为推广地热尾水回灌提供了理论依据和技术方法支撑。

### 3.2 热储动力场演化

区内地热水主要赋存于砂岩含水层，自然条件下，流动缓慢。伴随着大规模开采，集中开采区地热水位不断下降，形成了不同程度的地热水降落漏斗（图 7）。总体来看，开采程度最高的德城区-陵城区水位最低，为地热水降落漏斗中心。

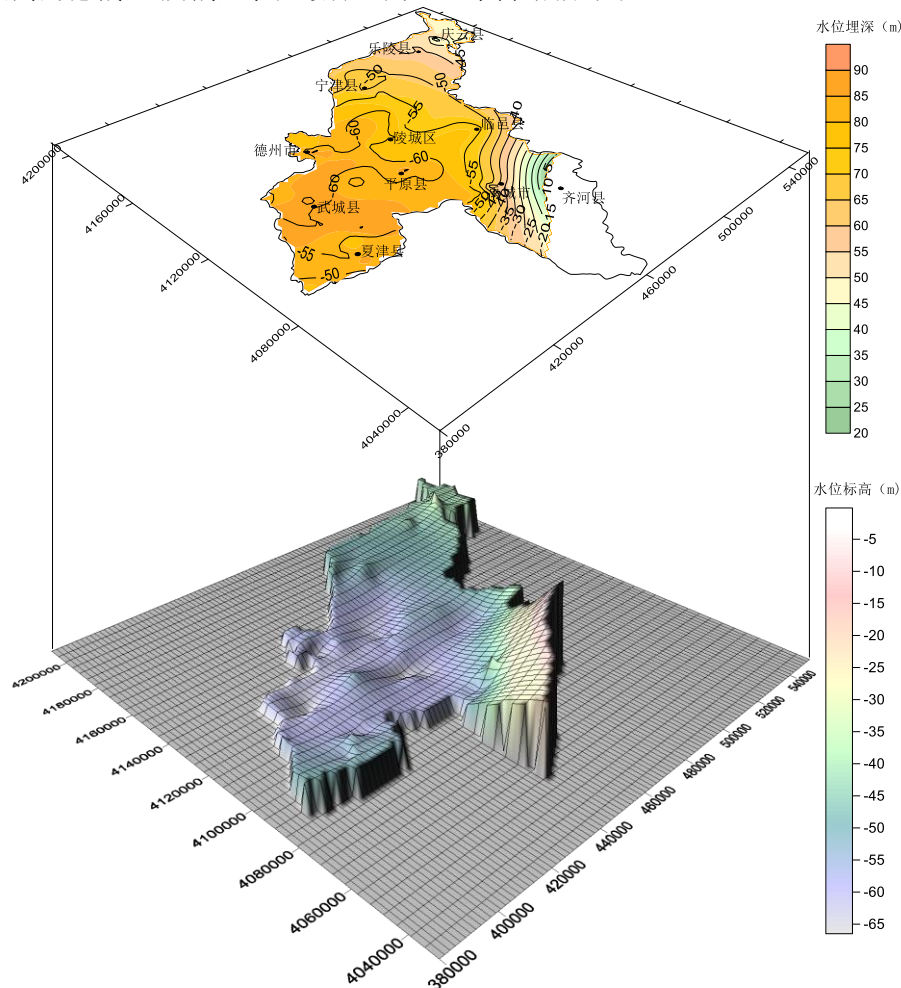


图7 德州市馆陶组热储水位埋深分区及等水压线图(2023年)

根据采灌量变化和水位动态响应规律，德州市开发利用程度最高的馆陶组热储水位动态可划分为三个阶段。以德州市水文家园地热井（德热1井）为例（图8），阐述地热水位动态演化特征及演化趋势：

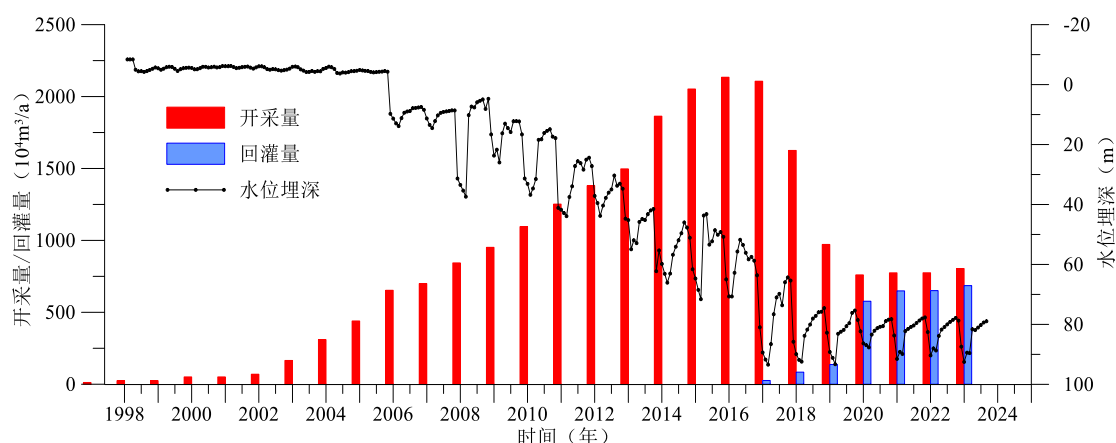


图8 德州市德城区地热水开采量-回灌量-水位动态图(德热1开采井)

Fig.8 Water level dynamic curve in Dezhou city (Dere 1 well)

(1)原始自流状态: 2005 年之前, 由于地热水开采量较小, 水位一直保持稳定, 处于自流状态, 水位埋深为-6~-4m (负值为自流时水头超过地面高度)。

(2)持续下降状态: 2005~2018 年, 随着房地产的不断发展, 地热供暖利用越来越多, 伴随开采量的不断增大, 水位持续下降; 其平均水位埋深由 2005 年的-2.36m 持续下降到 2018 年的 82.18m, 年降幅 6.5m。

(3)动态稳定状态: 2019~2023 年, 由于政策的影响, 区内开采井均配套回灌井, 并保证地热尾水全部回灌, 伴随着回灌量的增大和回灌率的增加, 热储基本达到采灌水量均衡, 水位处于动态平衡状态; 2019~2023 年平均水位埋深基本维持在 2.80~82.87 m。

通过统计不同地区、不同热储非供暖季地热井水位状况(图 9), 发现 2018 年大规模回灌后, 地热井水位下降趋势均大幅减缓、甚至回升, 指示地热尾水回灌能够缓解热储压力下降, 热储基本达到采灌量平衡。

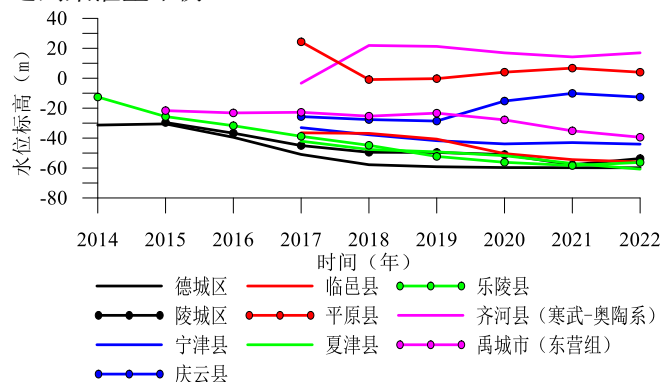


图9 2014~2022 年德州市不同地区、不同热储水位动态曲线

Fig.9 Dynamic curves of water levels in different regions and different reservoirs in Dezhou City from 2014 to 2022

### 3.3 温度场演化

温度监测包括井口温度监测以及全井段测温, 用以分析回灌条件下地温场演化特征。伴随着回灌过程中低温地热流体的回注, 形成以回灌井为中心向周围不断延伸的冷锋面, 逐渐向开采井运移。为了避免开采井热突破, 规模化回灌阶段除了常规监测井口温度外, 需重点监测回灌井全井段及其周边地温场演变规律和演化趋势, 为准确计算评价避免开采井热突破的临界采灌井距提供原位实测地温场演化数据支撑。

#### 3.3.1 开采井井口水温

井口水温与储层埋深、基岩起伏、断裂构造密切相关; 受控于“热折射”, 凸起区温度较高。德州市大部分地区馆陶组热储开采深度 1300~1700m, 井口水温 52~70℃; 禹城地区东营组热储开采深度 1900~2300m, 井口水温 58~68℃; 齐河地区寒武-奥陶系热储开

采深度 900~2200m，井口水温 40~75℃。1998~2023 年馆陶组热储开采井井口水温多年监测发现（图 10），井口水温多年基本保持动态稳定状态，表明现状采灌量和采灌井布局条件下，开采井未产生明显热突破。

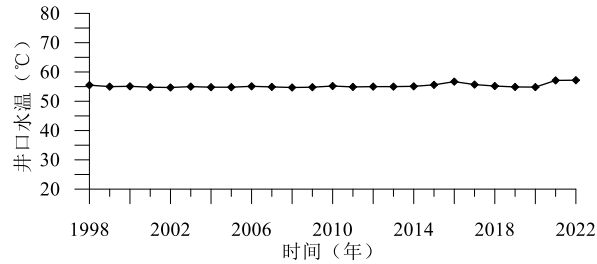


图 10 德州市德热 1 开采井井口水温动态曲线

Fig.10 Dynamic curve of wellhead water temperature of geothermal well Derel1 in Dezhou city

### 3.3.2 回灌井温度场演变规律与演化趋势

在地热对井采灌运行过程中，开采井抽取的地热流体经过换热后，大部分热能已被汲取，因此，当把温度降低的地热尾水通过回灌井回注至热储时，与热储原有温度较高的地热流体发生对流作用，同时不断吸收顶底板围岩和热储介质的热量，温度梯度驱动热传递作用，原有热储温度稳定状态被打破。以回灌井为中心，回灌冷水体冷锋面不断向外扩展，最终会运移到开采井，使开采井生产温度降低，影响地热采灌系统的使用寿命（Seibt et al., 2003; Diaz et al., 2016; Crooijmans et al., 2016）。

馆陶组是区内主要开采热储，以德城区德热灌 1 回灌井为例，分析馆陶组热储回灌条件下温度场演变规律与演化趋势。

回灌井垂向温度变化可分为 3 段：均匀变温段、均匀增温段、以及温度升幅递减段（图 11）。均匀变温段（0~80m）不含地热流体，主要受气温的影响。均匀增温段（80~1319m）整体表现为地温传导型增温的特点，垂向温度随深度加深线性增加。停灌后不同时间测温曲线在 600~800 m 深度左右有个交点，交点之上表现为温度下降，交点之下表现为温度上升，交点的温度与回灌温度大致相同，由于长时间的回灌，回灌井及周边地层温度趋于与回灌温度保持一致，交点之上原地层温度小于回灌温度，由于热传递，非回灌期该段温度趋于原始地层温度，所以温度下降；同理，交点之下原地层温度大于回灌温度，非回灌期该段温度上升。而交点附近地层原始温度与回灌尾水温度基本相同，因此基本保持稳定不变（刘帅等，2021）。基于该规律，可以通过测温曲线交点处温度推测回灌低温水温度约 34~35℃，与实际回灌尾水温度一致。

温度升幅递减段主要位于回灌层位即含水层段，回灌冷水温度恢复的热量来源，一是来自于底板大地热流传导热量，二是顶板非回灌段相对高温地层传导热量，三是回灌冷水体与其外围热储介质同层传导热，四是回灌冷水体与其外围热水体同层对流热，五是回灌冷水体内部热储介质释放热，在回灌冷水温度恢复的各项热量来源中，回灌冷水体与其外围热水体的同层对流热为占比最大的热量恢复来源，回灌冷水体锋面与其外围热储介质同层传导热为占比最小的热量恢复来源。（李嘉龙等，2025）。

根据回灌井 2018~2024 年测温数据统计，回灌井热储层回灌层段（1319~1525m）停灌后的温度恢复速率分别为 6.537、8.201、5.145、4.587、1.454、1.127、0.873℃/a（图 11-13），温度恢复速率 $\Delta T$ 随着回灌年数  $a$  的增加呈指数级衰减：

$$\Delta T = 21.860029e^{-0.4026288a}$$

相关系数  $R=0.9442$ ；

$\Delta T$ ——停灌后热储层回灌层段温度恢复速率，℃/a；

$a$ ——累积回灌年数，a。

根据该相关方程预测，回灌至第 10 年、15 年、20 年时，回灌井热储温度恢复速率分别降至 0.26、0.03、0.00℃/a。指示累计回灌年数达 20 年时，回灌井热储层的温度不再恢复增温。

其形成机制：回灌冷水体持续接受热储层顶底板的传导热，使得热储层顶底板内形成的低温降落漏斗范围不断扩展，导致低温降落漏斗内的温度梯度降低，热储层从顶底板汲取的热量随着回灌年数的增加迅速衰减。回灌冷水体持续接受热储层的同层对流热和传导热，使得热储层内温度过渡区范围不断扩展，导致温度过渡区内温度梯度降低，使得热储层从同层相对高温地层汲取的热量随着回灌年数的增加迅速衰减，加之冷锋面随回灌的持续、逐渐扩展远离回灌井筒，回灌冷水体通过同层对流和传导汲取的热量更加难以传递到回灌井筒周围的冷水体。在回灌的早期阶段，回灌冷水体从回灌井周边热储介质迅速汲取大量的热量，并随回灌冷水向回灌井周边的运移将热量带至远离回灌井井筒，随着回灌的继续进行，回灌井周边热储介质的温度趋近于回灌冷水的温度，使得回灌井周边的冷水体难以从内部热储介质汲取热量。总之，随着回灌年数的增加，回灌冷水温度恢复的热量来源都在迅速下降，导致回灌井筒周围冷水体的温度恢复速率呈指数级衰减（图 11-13）。

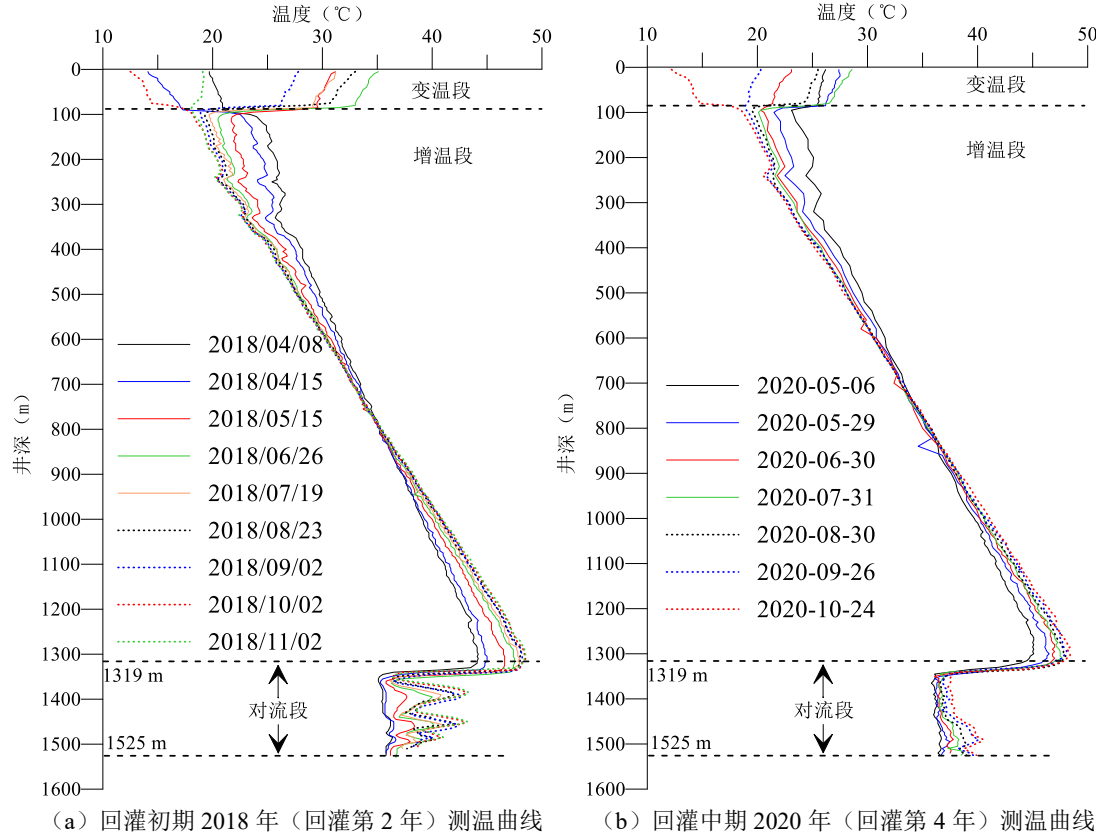


图 11 德州市德热灌 1 回灌井非采灌季全井段测温曲线  
Fig.11 Temperature logging curve of Dereguan1 reinjection well in Dezhou city

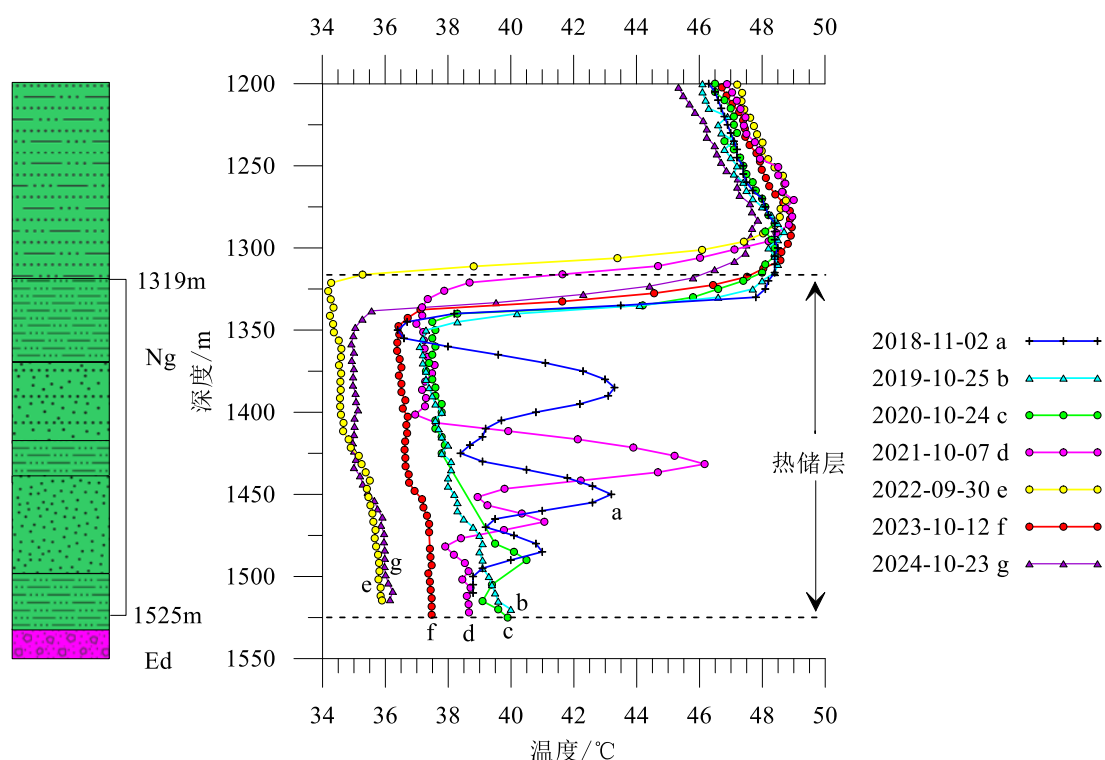


图 12 2018~2024 年德州市德热灌 1 回灌井回灌含水层段(1319~1525m)非采灌季测温曲线  
Fig.12 Aquifer temperature logging curve of Dereguan1 reinjection well in Dezhou city

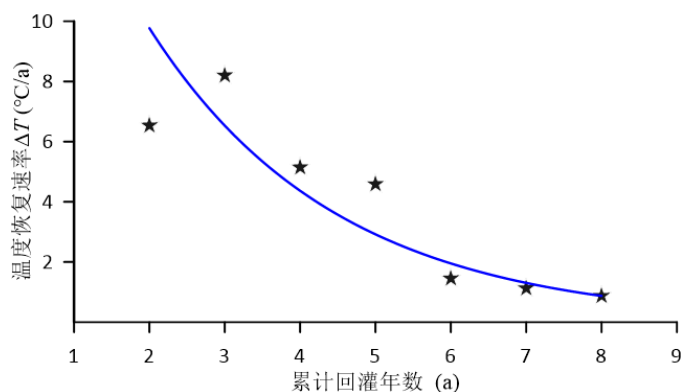


图 13 2018~2024 年德州市德热灌 1 回灌井回灌含水层段(1319~1525m)温度恢复速率变化图

Fig.13 Change of aquifer temperature recovery rate of Dereguan1 reinjection well in Dezhou city

起始回灌时间: 2016.12.14 至 2017.4.25。

横坐标: 2—回灌时间: 2017.11.15 至 2018.3.15, 测温时间: 2018.4-11;

3—回灌时间: 2018.11.15 至 2019.3.15, 测温时间: 2019.4-11; 4—回灌时间: 2019.11.15 至 2020.3.15, 测温时间: 2020.4-11;

5—回灌时间: 2020.11.15 至 2021.3.15, 测温时间: 2021.4-11; 6—回灌时间: 2021.11.15 至 2022.3.15, 测温时间: 2022.4-11;

7—回灌时间: 2022.11.15 至 2023.3.15, 测温时间: 2023.4-11; 8—回灌时间: 2023.11.15 至 2024.3.15, 测温时间: 2024.4-11

### 3.4 热储化学场演化

段晓飞等对鲁西北地区馆陶组热水水化学特征及控制因素进行了详细分析, 认为鲁西北地区地热水为弱碱性水, 其中主要阴、阳离子成分为  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ , 水化学类型以  $\text{Cl-Na}$  型为主; 蒸发浓缩作用是地热水水化学特征的主要控制因素, 地热水阳离子交换作用活跃, 使  $\text{Na}^+$  浓度升高,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度降低, 沉淀作用使  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  离子含量进一步下降, 二者共同作用造成地热水贫  $\text{Mg}$  的特征; 地热水水化学组分主要受蒸发岩类矿物和硅酸盐岩矿物溶解控制, 水中主要离子大部分来自于蒸发岩矿物的溶解, 少部分来自于硅酸盐岩矿物的溶解, 碳酸盐岩矿物的溶解对水化学成分控制作用微小 (段晓飞等, 2023)。



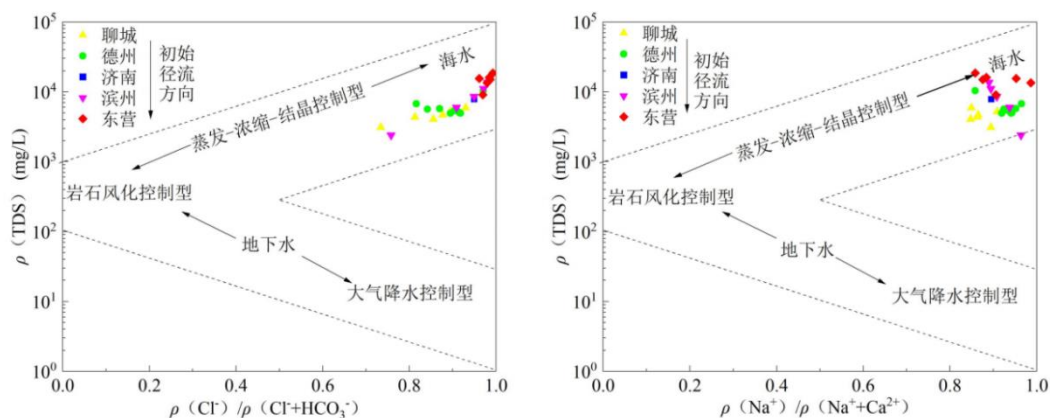


图 14 馆陶组地热水 Gibbs 图 (据段晓飞等, 2023)

Fig.14 Gibbs diagram of hot water in Guantao Formation

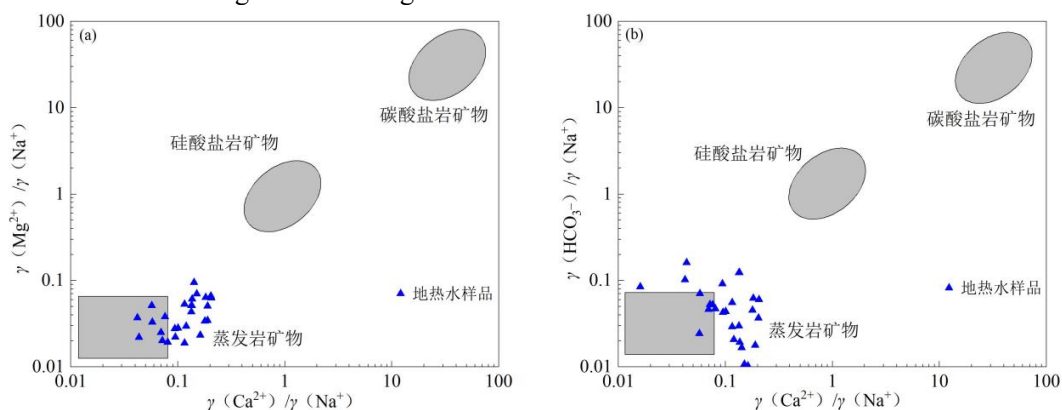


图 15 地热水离子来源相对贡献图

Fig.15 Geothermal water ion source relative contribution diagram

德州市 2022 年度不同地区、不同热储层热水水化学特征见图 16。总体上, 砂岩热储地热流体以 Cl-Na 型为主, 齐河县寒武-奥陶系热储地热流体水化学类型为  $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型。

近年来, 德州市大力推动地热尾水回灌工作, 而地热流体因受温度、压力及管道材质等影响在流动过程中发生化学反应产生的化学沉淀是影响回灌效果的重要因素之一 (刘雪玲等, 2009)。根据以往对部分地热井的流体垢样的鉴定可知, 沉淀的主要成分包括  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等化合物, 主要元素有 O、Si、Fe、Al、Cl 等 (殷肖肖等, 2023)。开采回灌过程中, 地热流体化学组分的变化主要表现为一定量的  $\text{CO}_2$  气体释放的同时产生  $\text{CaCO}_3$  或  $\text{MgCO}_3$  沉淀。

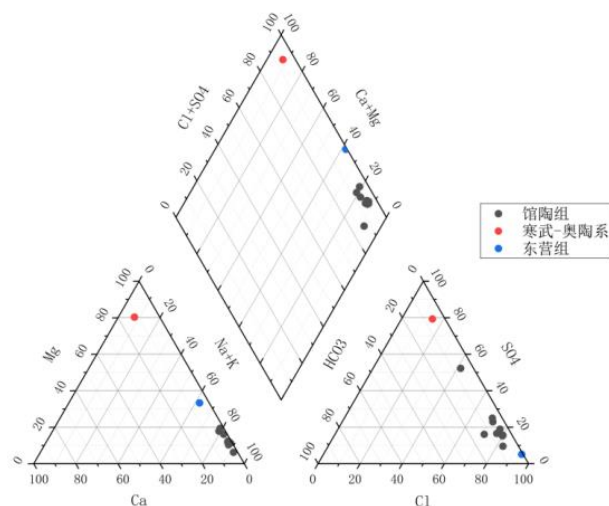


图 16 2022 年德州市热储地热流体 piper 图

Fig.16 Piper diagram of geothermal fluid in Dezhou georeservoir in 2022

通过对德州馆陶组热储多年的水质进行统计分析，各主要离子含量基本保持稳定状态（图 17）， $\text{Ca}^{2+}$ 离子、 $\text{HCO}_3^-$ 离子含量也未发生明显变化（图 18、图 19），说明地热流体的化学性质、离子组分在开采、回灌过程中，短期内的动态变化微弱，地热采灌系统尾水回灌对地热流体的水质影响较小，未改变地热流体的原始化学特征。

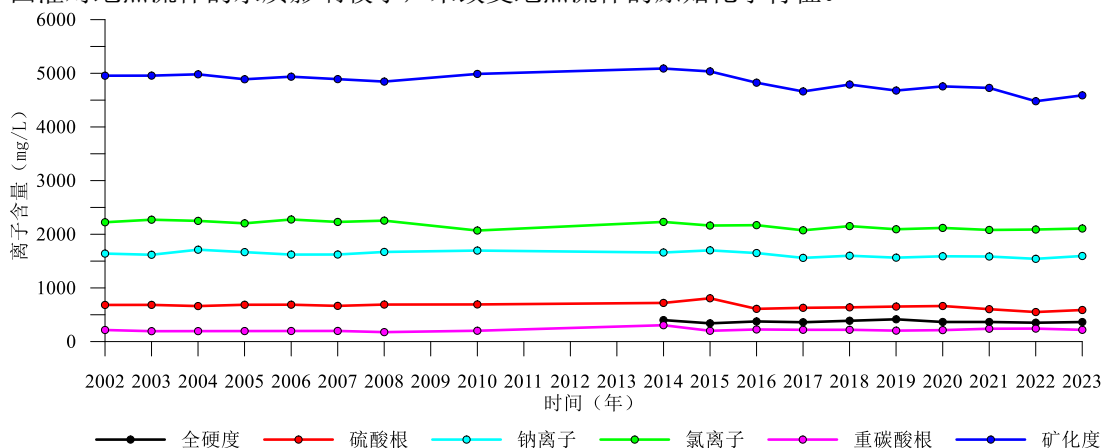


图 17 馆陶组热储地热流体主要离子含量多年动态曲线图

Fig.17 Multi-year dynamic curve of main ion content of geothermal fluid in Guantao Formation reservoir

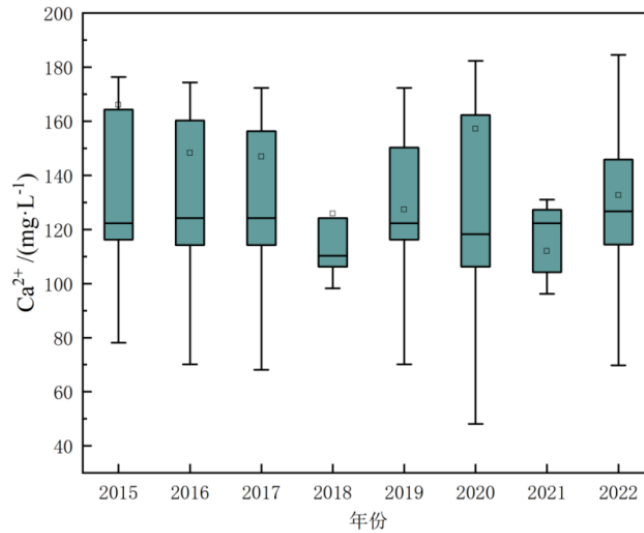


图 18 德州市馆陶组  $\text{Ca}^{2+}$  离子统计特征

Fig.18 Statistical characteristics of  $\text{Ca}^{2+}$  ions in Guantao Formation, Dezhou City

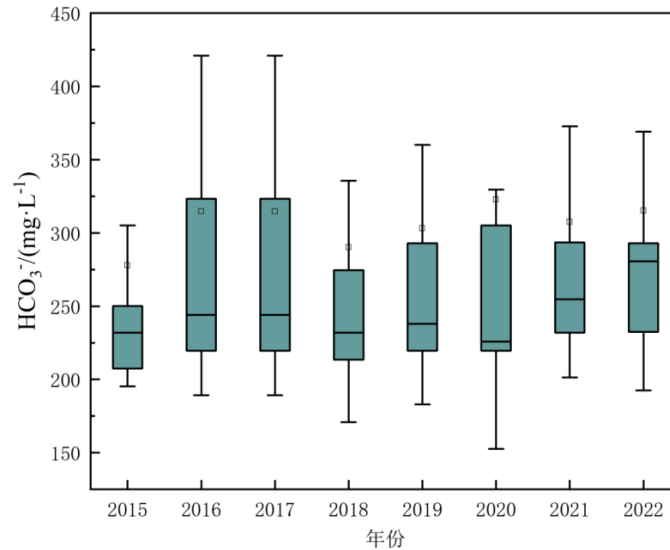


图 19 德州市馆陶组重碳酸根离子统计特征

Fig.19 Statistical characteristics of bicarbonate ions in Guantao Formation, Dezhou City

## 4 讨论

### 4.1 同层等量回灌能够实现热储地热水量采补平衡

地热资源虽然是可再生的清洁能源，但这种“可再生”也是有限度的，长期持续的无序开发也可能造成区域地热资源的枯竭（王贵玲等，2020）。地热回灌是避免地热废水直接排放引起热污染和化学污染的措施，并对维持热储压力，保证地热田的持续开采具有重要的作用，回灌是最有力的热储管理工具（Sanyal et al., 2011）。回灌已经成为世界范围内重要地热田生产运行中的一项日常工作，在过去的几十年里，全球至少有一半的地热田采用了完全回灌战略（Kamila et al., 2021）。

德州市地热开发始于 1997 年，2010 年以后地热开采程度逐渐增大，进入规模化开采阶段，逐步应用于地热供暖、理疗、养殖等多个领域，目前已在各县（市、区）形成了多个集中开采区。受多年集中开采的影响，开采井水位整体表现为下降状态，并且形成了以集中开采区为中心的多个漏斗区。德州市以开采新近纪馆陶组为主，地热水主要为盆地沉积物形成时保存下来的沉积水和封存水，另一部分为沉积物形成后由远近山区的大气降水补给（周绍智等，2007），由于补给十分缓慢，大量开采消耗的地热水并不能得到有效

补给，在规模化回灌前地热水位与开采量关系密切，随开采量的增大而迅速下降，如，水文家园地热井由 1997 年的自喷高度 4~6m，2018 年水位埋深已下降至 82.18m，年均下降 4.2m。随着地热供暖尾水回灌的规模化进行，回灌率逐年增大，地热水得到了有效补给，水位趋于平稳，平均水位埋深 2019~2023 年基本维持在 82.80~82.87m，指示人工开采是造成热储压力下降的主要原因，回灌可以有效减缓水位下降趋势，同层等量回灌能够实现热储地热水量采补平衡和热储压力平衡，在水量上保障地热资源的可持续开发利用。2018 年以来，德州市遵循“以灌定采、同层等量回灌”的开发原则，加强地热开发监管力度，建成了 200 多处地热回灌工程，大部分地热井水位保持动态稳定，部分地热井水位已止跌回升。

同样，由于区内地热水自然条件下更新能力较差，水化学类型较为稳定，主要离子含量虽有一定波动，但主要离子含量并没有因为长期采灌而发生较大变化。大规模回灌后，开发利用方式为“取热不耗水，同层等量回灌”，地热水在封闭的管道内自循环换热后，随回灌管道于回灌井液面以下回灌至热储层，基本不与大气或其他流体接触，未发生明显的化学反应，多年监测资料也证明了地热水主要离子含量动态基本稳定（图 17），因此，长期大规模开采、回灌不会对地热水化学造成较大影响。

## 4.2 不产生热突破约束下的临界采灌井距

德州市地热资源属沉积盆地型，主要热源机制为大地热流传导。同时，地温场与基岩凹凸起伏、断裂构造关系密切。一般在构造凸起部位，热储温度相对较高。多年动态监测显示，回灌前开采井井口水温未发生明显变化，说明长期开采不会对热储温度造成影响。回灌后部分地热井水温有所升高，如水文家园地热开采井水温升高了 2℃（图 10），是由于该开采井井深 1479.72m，未揭穿馆陶组热储底部高孔渗底砾岩；而回灌井井深 1536.44m，揭穿了馆陶组底部高孔渗底砾岩，加之两井间距只有 180m，长期回灌致低温冷水运移至开采井底部，导致开采井底部水头压力升高，驱动相对高温的地热流体上涌，造成了开采井短时间内出现井口温度上升。这种现象证明了采灌井距较小时，低温尾水长期回灌能够对开采井水温造成影响，产生热突破。因此，为在水温上保障地热资源可持续开发利用，采灌井间距须大于产生热突破的临界采灌井距。

李嘉龙等（2023）根据温度场和动力场长期动态监测资料，利用 Comsol Multiphysics 数值模拟软件建立德城区区域水—热耦合数值模拟模型，模拟热储层中地热水开采和取热后的冷水回灌，驱动温度场和动力场时空演变规律与趋势预测，建立热突破时间与采灌量和采灌井距的函数方程：在一定的采灌量  $Q$  条件下，开采井的热突破时间  $t$  随采灌井间距  $R$  的增大呈幂函数关系增长：

$$t_Q = aR^{2.4}$$

式中， $t_Q$  为开采井产生热突破的临界时间（a）；下标  $Q$  表示采灌量； $R$  为采灌井间距（m）； $a$  为比例系数

比例系数  $a$  随采灌量的增大而减小，表明开采井的热突破时间  $t$  随采灌量  $Q$  的增大而减小。根据该公式可知：采灌井距为 180 m 的对井采灌系统，运行 100 年不发生热突破的采灌量应不大于 30 m<sup>3</sup>/h；采灌量为 72 m<sup>3</sup>/h 时，不发生热突破的临界合理采灌井间距应不小于 300 m（李嘉龙等，2025）。

德州市自 1998 年开始进行地热资源动态监测，历经 26 年的发展完善，已形成地热资源监测历史悠久、监测内容丰富、监测规模较大、监测水平较高的地热动态监测体系：目前德州市已对开发利用的 322 眼开采井、329 眼回灌井进行了实时监测，全面监测开采回灌过程中水量、水温和水质的变化，对典型采灌井进行了全井段温度监测，并按年度形成监测成果报告、图件、数据库等；在执行国家、行业标准基础上，制定了省级回灌、监测规范，形成了自动化监测体系，为水-热采灌均衡约束下的地热资源可持续开发利用提供了实时动态监测数据支撑。

## 5 结论

（1）德州市地热资源开发可划分为四个阶段：①1997 年至 2005 年，开采量小，开采馆陶组热储；②2006 年至 2010 年，开采量缓慢增加，开始开采东营组、寒武-奥陶系热储；③2011 年至 2018 年，开采量迅速增加，少数地热井进行了回灌；④2019 年至今，规

范化管理，开采量降低，回灌量增加。

(2) 德州市地热尾水回灌工作开始于 2006 年，可划分为五个阶段：①探索试验阶段（2006~2012），针对开发利用程度较大的新近纪馆陶组热储进行了对井回灌试验；②回灌量突破阶段（2012~2013），首次采用深井大口径填砾成井工艺施工回灌井，取得回灌量突破；③生产性回灌试验阶段（2013~2019），采用深井大口径填砾成井工艺进行了生产性回灌，回灌率达到了 80%以上，为规模化回灌提供了技术支撑；④规模化回灌阶段（2019~2022），全市大规模施工地热回灌井，所有供暖用地热井均配备回灌井，回灌进入大规模实施阶段。⑤采灌均衡推广阶段（2022 年至今），制定出版地热尾水回灌技术规程，出版砂岩热储工程技术专著，推广应用砂岩热储地热尾水回灌技术。

(3) 德州市馆陶组热储水位埋深与开采、回灌状态密切相关，开采量大是造成水位快速下降的主要原因，同层等量回灌可有效减缓地热水位下降。动态可分为三个阶段：① 2005 年以前由于开采量较小，热储地热水头高出地面 4~6m；②2005~2018 年，由于未进行回灌，水位表现为持续下降状态，德热 1 开采井水位埋深由 2005 年的 -2.36m 持续下降到 2018 年的 82.18m；③2019~2023 年，伴随着回灌量的增大和回灌率的增加，热储基本达到采灌水量均衡，热储水位处于动态平衡状态，平均水位埋深基本维持在 82.80~82.87m。

(4) 德州市开采井井口水温多年保持相对稳定，长期开采未出现明显变化。回灌井回灌冷水温度恢复的热量来源，一是来自于底板大地热传导热量，二是顶板非回灌段相对高温地层传导热量，三是回灌冷水体与其外围热储介质同层传导热，四是回灌冷水体与其外围热水体同层对流传热，五是回灌冷水体内部热储介质释放热。

(5) 全井段测温显示，回灌井热储层回灌层段温度恢复速率  $\Delta T$  随着回灌年数  $a$  的增加呈指数级衰减： $\Delta T = 0.0336691 e^{-0.2672243a}$ ；据其预测回灌至第 20 年时，回灌井热储层的温度恢复速率为 0。

(6) 多年水化学动态监测显示，德州市主要开采热储地热流体的化学组分含量基本稳定，长期开采、回灌没有对热储水质造成影响，没有改变地热流体的原始化学特征。

## References

- Crooijmans R A, Willems C J L, Nick H M, Bruhn D F. 2016. The influence of facies heterogeneity on the doublet performance in low-enthalpy geothermal sedimentary reservoirs. *Geothermics*, 2016, 64:209~219.
- Diaz A R, Kaya E, Zarrouk S J. 2016. Reinjection in geothermal fields-A worldwide review update. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 53:105~162.
- DUAN Xiaofei, WU Xiaohua, HUANG Xing, et al. 2023. Hydrochemical characteristics and controlling factors of hot water in Guantao Formation in northwestern Shandong. *Geological Review*, 69(S1):473~475 (in Chinese with English abstract).
- Duan Xiaofei, Kang Fengxin, Wu Xiaohua, et al. 2023. Calculation method of reasonable well spacing in sandstone geothermal reservoir based on production-reinjection equilibrium simulation [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology* (in Chinese with English abstract).
- Fengxin Kang, Xunchang Yang, Xuepeng Wang, et al. 2022. Hydrothermal Features of a Sandstone Geothermal Reservoir in the North Shandong Plain, China. *Lithosphere*, 2022(1): 1-20.
- Kamila Z, Kaya E, Zarrouk S J. Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020 [J]. *Geothermics*, 2021, 89:101970.1-101970.88.
- Kang Fengxin, Ma Zhemin, Shi Qipeng, et al. 2023. Renewable Capacity of Karst Geothermal Water and Production Reinjection Balanced Resources Evaluation: A Case Study of Heze Buried Uplift Geothermal Fields. *Earth Science*, 48(3):1118-1137 (in Chinese with English abstract).
- Kang Fengxin, Zhao Jichu, Tan Zhirong, et al. 2021. Geothermal Power Generation Potential in the Eastern Linqing Depression. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1870-1881.
- KANG Fengxin, ZHOU Qundao, ZHAO Sumin, et al. 2020. Technical regulation for geothermal return water reinjection of sandstone reservoir (DZ/T 0330—2019). Geological Publishing House (in Chinese).



- KANG Fengxin. 2022. Sandstone thermal storage engineering technology and application. East China University of Science and Technology Press (in Chinese).
- KANG Fengxin, ZHOU Qundao, ZHANG Tinghui, et al. 2023. Technical specification for hydrothermal geothermal return water reinjection (NB/T 11158—2023). China Petrochemical Press (in Chinese).
- Li Jialong, Kang Fengxin, Yang Yabin, et al. 2025. Temperature field evolution rule, response mechanism and recovery ability of a production-reinjection doublet system in sandstone geothermal reservoirs. *Acta Geologica Sinica*, 99(2):568~587 (in Chinese with English abstract).
- LIU Guiyi. 2001. Basic Characteristics of Deep Ground Water and Groundwater Environmental Problems in Lubei Plain. *Shandong Land and Resources*, 17(5) : 43~47 (in Chinese with English abstract).
- LIU Shuai, LIU Zhitao, FENG Shoutao, et al. 2021. Effect of heating tail water recharge on geothermal field of sandstone heat storage: A case study in northern Shandong Province. *Geological Review*, 67(5):1507~1520 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Wang Guiling, Zhang Shengsheng, et al. 2021. Heat aggregation mechanisms of hot dry rocks resources in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(6):1793~1804.
- LIU Xueling, ZHU Jialing. 2009. A study of clogging in geothermal reinjection wells in the Neogene sandstone aquifer. *HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY*, 5:138~141 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhitao, Liu Shuai, Song Weihua, et al. 2019. Change characteristics of geothermal field for geothermal return water reinjection of sandstone reservoir in the northern Shandong. *Acta Geologica Sinica*, 93(s1):149~157 (in Chinese with English abstract).
- MU Linkai. 2018. STUDY OF OCCURRENCE CHARACTERISTICS AND FORMATION MODEL OF GEOTHERMAL WATER IN SHANDONG PROVINCE. Master's thesis of Shandong University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- NIU Shouze. 2022. Study on the Origin of Geothermal Water in the Gaoyang Low Uplift. Master's thesis of China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- QIN Yaojun, ZHANG Pingping. 2018. Development and Utilization of Geothermal Resources in the Middle and Deep Layers of Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 34(10) : 93-98 (in Chinese with English abstract).
- Seibt P, Kellner T. Practical experience in the reinjection of cooled thermal waters back into sandstone reservoirs [J]. *Geothermics*, 2003, 32(4-6):733-741.
- Sanyal S K, Eneedy S L. Fifty years of power generation at the Geysers geothermal field, California: The lessons learned [J]. *Proceedings of Thirty-sixth Workshop on Georeservoir Engineering* Stanford University, Stanford, California, 2011, January 31~February 2.
- Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923~1937 (in Chinese with English abstract).
- WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. 2020. The status and development trend of geothermal resources in China, *Earth Science Frontiers*, 27(1): 001-009 (in Chinese with English abstract).
- WANG Yanjun, WANG Zhenguo, WANG Yan, et al. 2005. Exploitation and Protection of Geothermal Resource in Dezhou City. *Shandong Land and Resources*, 21 (5) : 31-35 (in Chinese with English abstract).
- WANG Yanjun, LIU Guiyi, HU Songtao. 2008. Division of the Geothermal Resources in the Northern Shandong Province. *GEOLOGICAL SURVEY AND RESEARCH*, 31(3):270~277 (in Chinese with English abstract).
- YAN Shiqiang, LIU Guiyi, MENG Qingfeng, et al. 2001. Geothermal Resource Characteristics and Its Exploitation Future in Dezhou City. *Shandong Land and Resources*, 17 (2) : 48-52 (in Chinese with English abstract).
- YAN Shiqiang, PAN Mao, ZOU Zuguang, et al. 2007. Geochemical characteristics and origin of geothermal water in the Dezhou hollow. *Geology in China*, 34(1):149~152 (in Chinese with English abstract).
- YANG Xunchang, WANG Chengming, FENG Shoutao, et al. 2011. Study on Relationship between Movement and Extraction of Geothermal Water in Dezhou City. *Shandong Land and*

- Resources, 27(7):25-28 (in Chinese with English abstract).
- Yin Xiaoxiao, Zhao Sumin, Cai Yun, Yan Jiaxian, Xu Lei. 2023. Dynamic evolution of georeservoir characteristics in Tianjin in the last three decades of large-scale development. Acta Geologica Sinica.
- ZHAO Jichu. 2013. Lubei geothermal tail water reinjection experiments in sandstone reservoir. Shandong Land and Resources, (29) : 23-30(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Shaozhi, ZOU Zuguang, CHUAI Yunxiang. 2007. Analysis of the Geological Characteristics and Exploration, Development and Utilization of the Northern Shandong Geothermal Field in Shandong Province. Collected Works of Environmental Geology in Shandong Province, 169~175.(in Chinese).
- ZHOU Shihai, YANG Xunchang, LIANG Wei, et al. 2007. Study on Geothermal Re-injection Experiment in Districts in Dezhou City. Shandong Land and Resources, 23 (9) : 11-14 (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 段晓飞, 康凤新, 吴晓华, 等. 2023. 基于采灌均衡模拟的砂岩热储合理采灌井距计算方法. 地质科技通报. doi:10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230268.
- 段晓飞, 吴晓华, 黄星, 孙晓晓. 2023. 鲁西北地区馆陶组热水水化学特征及控制因素. 地质论评, 69 (增刊 1) : 473-475.
- 康凤新, 周群道, 赵苏民等. 2020. 砂岩热储地热尾水回灌技术规程 DZ/T 0330—2019 北京: 地质出版社.
- 康凤新. 2022. 砂岩热储工程技术与应用. 上海: 华东理工大学出版社, 228-232.
- 康凤新, 马哲民, 史启朋等. 2023. 岩溶热储地热水可更新能力及采灌均衡可持续开采量: 以菏泽潜凸起地热田为例. 地球科学, 48(03): 1118-1137.
- 康凤新, 周群道, 张廷会等. 2023. 水热型地热尾水回灌技术规程 NB/T 11158—2023[S]. 北京: 中国石化出版社.
- 李嘉龙, 康凤新, 杨亚宾, 等. 2025. 砂岩热储地热能对井采灌温度场演变规律与响应机制和恢复能力. 地质学报, 99(2): 568~587.
- 刘桂仪, 孟庆峰. 2000. 德州市低温地热资源及开发利用研究. “九五”全国地质科技重要成果论文集, 628~632.
- 刘桂仪. 2001. 鲁北平原深层地下水基本特征与水环境问题. 山东地质, 17(5) : 43~47.
- 刘帅, 刘志涛, 冯守涛, 等. 2021. 采暖尾水回灌对砂岩热储地温场的影响——以鲁北地区为例. 地质论评, 67(5): 1507~1520.
- 刘雪玲, 朱家玲. 2009. 新近系砂岩地热回灌堵塞问题的探讨. 水文地质工程地质, 5: 138~141.
- 刘志涛, 刘帅, 宋伟华, 等. 2019. 鲁北地区砂岩热储地热尾水回灌地温场变化特征分析. 地质学报, 93(S1): 149~157.
- 牟林凯. 2018. 山东省地热水赋存特征及其形成模式研究. 山东: 山东科技大学.
- 牛首泽. 2022. 高阳低凸起地热成因机制研究. 北京: 中国石油大学(北京).
- 秦耀军, 张平平. 2018. 山东省砂岩热储地热资源开发利用模式探讨. 山东国土资源, 34(10) : 93-98.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势. 地学前缘, 27(1): 1~9.
- 王贵玲, 蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式. 地质学报, 94(7): 1923~1937.
- 王彦俊, 王贞国, 王岩, 等. 2005. 德州市地热资源开发与保护. 山东国土资源, 21 (5) : 31-35.
- 王彦俊, 刘桂仪, 胡松涛. 2008. 鲁北地区地热资源区划研究. 地质调查与研究, 31 (3) : 270~277.
- 颜世强, 刘桂仪, 孟庆峰, 等. 2001. 德州市地热资源及开发利用. 山东地质, 17 (2) : 48-52.
- 颜世强, 潘懋, 邹祖光, 等. 2007. 山东德州凹陷地下热水地球化学特征及成因. 中国地质, 34 (1) : 149~152.
- 杨询昌, 王成明, 冯守涛, 等. 2011. 德州市城区地热水动态与开采量关系. 山东国土资源,

27(7):25-28.

殷肖肖,赵苏民,蔡芸,等.2023. 近三十年天津市地热大规模开发热储动态特征研究.地质学报, doi: 10.19762/j.cnki. dzhixuebao.2023017.

赵季初. 2013. 鲁北砂岩热储地热尾水回灌试验研究. 山东国土资源, (9) : 23-30.

周绍智,邹祖光,啜云香.2007. 山东省鲁北地热田地质特征及勘查开发利用分析. 山东省环境地质文集: 169~175.

周世海,杨询昌,梁伟,等. 2007.德州市城区地热水人工回灌试验研究.山东国土资源, 23 (9) : 11-14.