

采暖尾水回灌对砂岩热储地温场的影响

——以鲁北地区为例

刘帅^{1,2)}, 刘志涛^{1,2)}, 冯守涛^{1,2)}, 王学鹏^{1,2)}, 白通^{1,2)}, 马雪梅³⁾, 王华飞⁴⁾

www.
geojournals.cn/georev

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), 山东德州, 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, 山东德州, 253072;

3) 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定, 071051;

4) 中科华鲁土壤修复工程有限公司, 山东德州, 253072



内容提要:为保证地热资源可持续开发利用,深入开展回灌工程采灌井合理井距研究、防止短时间内发生热突破是地热领域的重大关切。本文根据全井段测温结果,对砂岩热储不同采灌工程地温场变化特征进行了分析。研究表明:随着回灌年度的增加,冷水范围越来越大,热量对回灌井有效补给路径变长,回灌井热储段温度曲线波动幅度越小;当采灌井距较小、底部温度相对较低时,回灌冷水会对开采井造成影响,致使开采井热储温度降低;在回灌初期热对流在热量恢复中占主导作用,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,因此,在规模化回灌条件下,热突破是必然的。

关键词:地热尾水回灌;砂岩热储;地温场

地热资源作为集热能、水资源为一体的可再生能源和清洁能源,受到越来越多的关注(Rybäck et al., 1999; Axelsson et al., 2002; Sullivan et al., 2005; 康凤新等, 2013;), 并且在清洁能源取暖中发挥着越来越重要的作用。鲁北地区地热资源较为丰富,主要为砂岩热储,已大规模开采十多年,但存在尾水直排造成的水资源浪费和热储水位显著下降的问题,并对周边环境造成了一定的热污染和水化学污染(陶虹和丁佳, 2014; 吴立进等, 2016)。

地热尾水回灌是解决以上问题的有效途径(何满潮等, 2003; 朱家玲等, 2012; 刘志涛等, 2019; 王学鹏等, 2020)。但在鲁北地区近几年的回灌研究中发现,低湿地热尾水回灌又出现了新问题,即回灌井周边热储温度降低,在下一个供暖季之前远不能恢复到最初的热储温度(刘志涛等, 2019; 冯守涛等, 2019),使得开采井和回灌井交替使用以缓解回灌井的堵塞问题的设想落空。本文以期通过分析几个地热采灌工程的地温场测温资料,研究地热尾水回

灌后回灌井周边地温场变化特征,对鲁北平原和其他类似地区的地热利用有所借鉴。

1 地质背景

鲁北地区是在华北地台基础上发展起来的中新生代断陷盆地,在大地构造单元上属于华北板块(I级)的华北坳陷区(II级)。中新生代以来,受燕山运动和喜马拉雅运动的影响,断裂构造发育,形成凸凹相间的III级构造单元济阳坳陷(III级)、临清坳陷(III级)(刘桂仪, 2001; 颜世强等, 2007; 王彦俊等, 2008; 刘志涛等, 2019)。在坳陷和隆起区内受断裂活动的影响和控制,形成了众多的次级构造单元——凸起与凹陷(图1)。区内除无棣大山等局部地区有基岩出露外,其余均被第四纪沉积物覆盖。区内自中新世以来,受差异性升降运动的影响,一直缓慢下沉,沉积了厚度巨大的新生代地层,由老到新为古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组,第四系平原组(杨询昌等, 2019)。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(批准号:42072331)、山东省地质科研项目(鲁地字[2020]4号文, 编号:202016)和中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20190259)的成果。

收稿日期:2020-11-27; 改回日期:2021-05-18; 网络首发:2021-07-20; 责任编辑:赵雪、章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.07.013

作者简介:刘帅,男,1989年生,学士,工程师,主要从事地热地质研究;Email: 332182068@qq.com。通讯作者:马雪梅,女,1990年生,研究生,工程师,主要从事水文地质研究;Email: 247523354@qq.com。

区内地热资源形成受地壳深部的地幔结构、岩浆活动和地壳浅部地质构造、地层岩性、地下水活动等影响,与盖层(保温层)、热储空间、热源和热水补给源等因素有关(刘志涛等,2019),主要热储有新近系馆陶组、古近系东营组砂岩孔隙裂隙热储,寒武系—奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶热储。其中馆陶组为区内最具开发利用的热储(康凤新等,2013;刘志涛,2019),根据已有地热井测温资料,馆陶组热储地热水温度大多小于90℃,属于低温地热资源。

馆陶组热储的盖层为第四系平原组和明化镇组松散沉积层的黏性土与砂性土组成的松软层。馆陶组砂岩、砂砾岩富水性强,该层既传热又储热、储水,具备了较好的储集空间,构成了区内馆陶组孔隙—裂隙层状热储层。热源主要来自正常的地壳深部及上地幔传导热流和深部岩浆热,沧州—聊城—兰考、广饶—齐河等规模较大的超壳断裂对地壳深部和上地幔的岩浆热源起到了重要的沟通和传导作用,并构成地下热流的良好通道。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;刘志涛等,2019)。

2 研究方法

本文通过多个地热回灌井的全井段测温资料,分析了相同采灌条件下不同年份以及不同采灌条件下地热尾水回灌对地温场影响。本次监测5个采灌工程(图1),分别位于德州市德城区水文家园、德州市陵城区郑家寨镇、德州市武城县宏图嘉苑、禹城市宜家北苑、东营市垦利区凯旋广场,其中水文家园地热井重点监测,各工程回灌井部分参数见表1。

2.1 测温工程概况

2.1.1 德城区水文家园

德城区水文家园采灌工程共测井3个,包括开采井、回灌井和观测井(图1),开采井与回灌井间距180 m左右,中间有一停用的开采井作为观测井进行监测。该回灌井施工于2016年,至2020年10月,已回灌4个供暖季,回灌井2019年11月8日至2020年4月2日回灌期间,回灌水温28.3~38.7



图1 鲁北地质构造及测温点示意图

Fig. 1 Sketch map of geological structure and temperature measuring points of northern Shandong

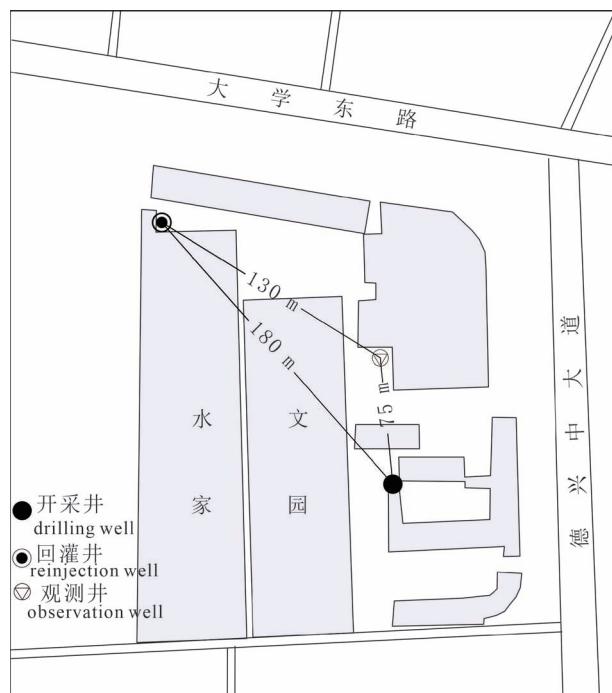


图2 德州市德城区水文家园地热井相对位置图

Fig. 2 Map of relative location of geothermal wells in the Hydrological Home of Decheng District, Dezhou City

℃, 累计平均 34.12 ℃。

2.1.2 郑家寨镇

郑家寨镇地热供暖工程包括 2 眼开采井及 2 眼回灌井(图 3), 采用 1 对 1 方式进行回灌, 即开采 1 井开采的供暖尾水回灌至回灌 1 井, 井距约 250 m, 开采 2 井供暖尾水回灌至回灌 2 井, 井距约 270 m。

表1 鲁北地区回灌井含水层和滤水管基本情况一览表

Table 1 Basic condition list of aquifers and filter pipes of recharge wells in northern Shandong

项目	德州市德城区 水文家园	德州市陵城区 郑家寨镇	德州市武城县 宏图嘉苑	禹城市 宜家北苑	东营市垦利区 凯旋广场
成井深度(m)	1536	1350	1600.26	1914.57	1800
开采层位	馆陶组、东营组	馆陶组	馆陶组	馆陶组、东营组	馆陶组、东营组
岩性	砂砾岩	砂砾岩	粗砂岩含砂砾岩	砂砾岩	砂砾岩
孔隙度	0.33	—	0.24~0.38	—	0.32
取水层位置(m)	1346~1525	1242~1319	1414.50~1607.70	1192.50~1888.90	1302~1680
取水层厚度(m)	155	118	148.7	162.90	—
滤水管直径(mm)	Φ177.8	Φ177.8	Φ177.8	Φ177.8	Φ177.8
滤水管总长度(m)	169.58	—	110.99	174.27	—
取水段孔径(mm)	Φ450	Φ241.3	Φ450	Φ400	—
井身结构	二开直井	二开直井	二开直井	二开直井	二开直井
降深(m)/涌水量(m^3/h)	14.38/92.24	13/90	18.1/88	45.5/80	28.47/76.03
渗透系数 K (m/d)	1.03	0.95	0.87	0.54	0.7~1.0
水温(℃)	57	56	61	52.5	59
年回灌量($\times 10^4 m^3$)	20	18	18.5	13.0	15.8

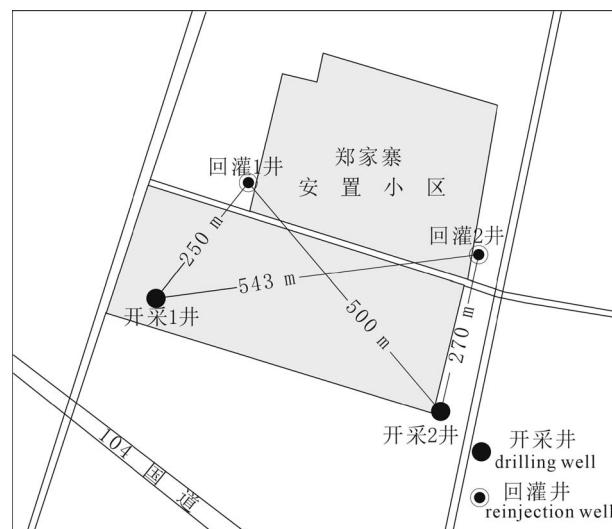
图3 德州市陵城区郑家寨镇地热供暖
工程地热井相对位置图

Fig. 3 Map of relative location of geothermal wells of geothermal heating project in Zhengjiazhai, Lingcheng district, Dezhou

开采井水温约 56 ℃, 回灌尾水温度 32~34 ℃, 大致与德城区水文家园回灌情况相同。

2.1.3 宏图嘉苑

宏图嘉苑地热供暖工程包括 2 眼开采井及 2 眼回灌井(图 4)。开采井水温约 60 ℃, 回灌尾水温度 32 ℃左右, 单井年回灌量 18.5 万 m^3 。

2.1.4 宜家北苑

宜家北苑地热供暖工程包括 3 眼开采井及 3 眼

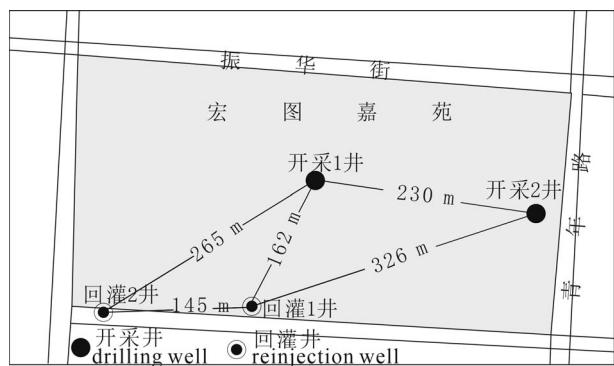


图 4 德州市武城县宏图嘉苑地热井相对位置图

Fig. 4 Map of relative location of geothermal wells in Hongtujiaoyuan, Wucheng County, Dezhou

回灌井(图5)。根据调查得知,开采井水温约57℃,回灌尾水温度32℃左右,三个开采井抽水供暖后,供暖尾水自由分配至三个回灌井,根据回灌数据,回灌1井回灌量为50 m³/h左右。

2.1.5 凯旋广场

凯旋广场地热供暖工程包括1眼开采井及1眼回灌井(图6),采灌井间距100 m左右开采井水温约59℃,回灌尾水温度32℃左右,回灌量为60 m³/h左右。

2.2 测温概况

2020年度全井段测温工作在4月至10月进行(表2)。测温方式为将温度传感器通过回灌井井筒下放至井底,每5 m记录一个温度数据,分辨力0.1℃。每次单井测温获得温度数据300点以上。同时

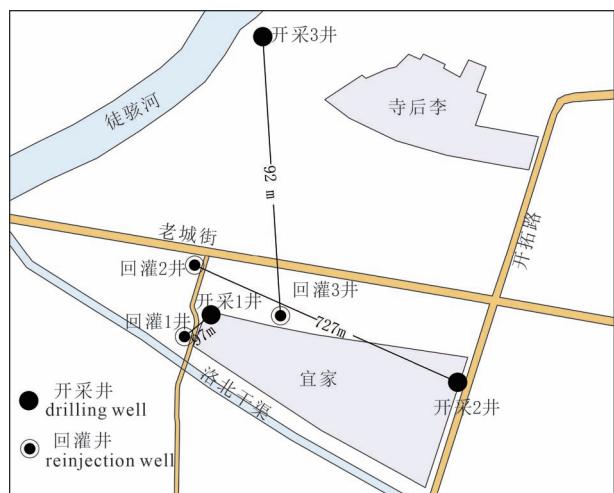


图 5 禹城市宜家北苑地热井相对位置图

Fig. 5 Map of relative location of geothermal wells in Yijiabeiyuan, Yucheng City

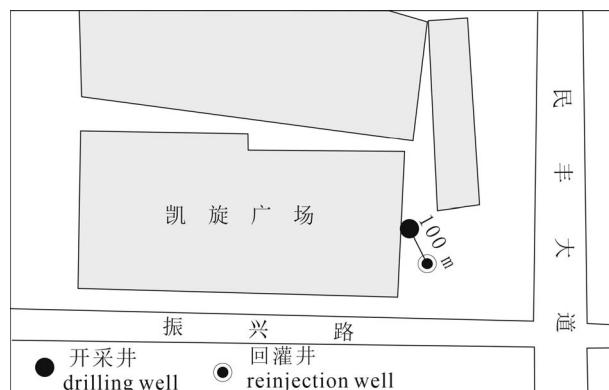


图 6 东营市垦利区凯旋广场地热井相对位置图

Fig. 6 Map of relative location of geothermal well in Kaixuan Square, Kenli District, Dongying City

收集了水文家园、郑家寨镇等工程前几年度的测温资料。

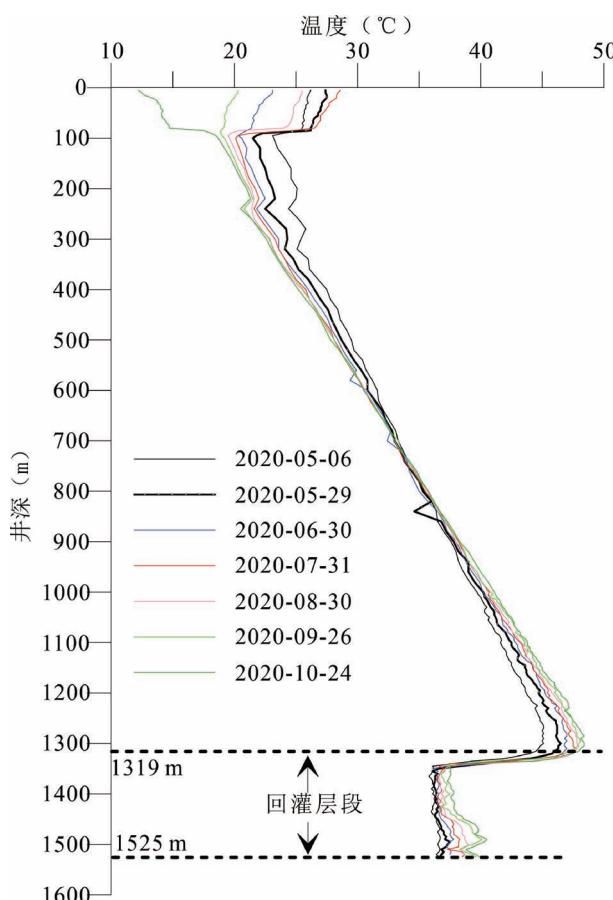


图 7 2020 年德州市德城区水文家园回灌井全井段测温曲线图

Fig. 7 Temperature measurement curves of the whole well section of recharge well in the Hydrological Home, Decheng District, Dezhou, in 2020

表 2 鲁北回灌井测温时间一览表

Table 2 Schedule of temperature measurement of recharge wells in northern Shandong

地点	类别	次数(次)							
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	合计
水文家园	开采井	1			2	1	1	1	6
	回灌井		2	1	1	1	1	1	7
	观测井	1	1			1			3
郑家寨镇	开采井			1				1	2
	回灌井			1	1			1	3
宏图嘉苑	开采井		1				1		2
	回灌井		1		1		1		3
宜家北苑	开采井		1				1		2
	回灌井		1		1		1		3
凯旋广场	开采井		1				1	2	
	回灌井		1		1		1	3	
合计								36	

3 地温场变化特征分析

3.1 回灌井地温场变化特征分析

根据以上测温工作,绘制了不同工程回灌井垂向温度变化曲线(图 7 至图 9),根据温度变化整体

特征,自井口至井底可分为三个区段,分别为均匀变温段、均匀增温段和温度波动段。

(1) 均匀变温段,该段自井口起,底部深度各次测温有所不同,在 65~90 m,平均 80 m,与水位埋深基本一致。该段测温曲线特征为随深度增加而较均匀的上升或下降,测温结果为上升趋势正好对应大气环境温度较低时,下降趋势正好对应气温较高时,说明本段升降与气温关系密切。

该段位于地热水水位以上,测温结果受气温和地层温度的共同影响,但分析受气温影响更为显著,因为按照一般的地温变化特征,在深度 20 m 左右会存在一个恒温带,恒温带以下为增温带,地温随深度增加会逐渐增加,而该井 20 m 以下测温曲线并未表现出该特征。本井测温曲线显示,气温影响深度远大于恒温带深度,主要是因为回灌井井管材质为钢管,导热性好,热量主要通过井管传导至下部,另外该段井筒内为空气,其密度和比热很小,且井径最大也仅有 450 mm,空气体积有限,很容易受传导热量的影响而引起温度的改变。

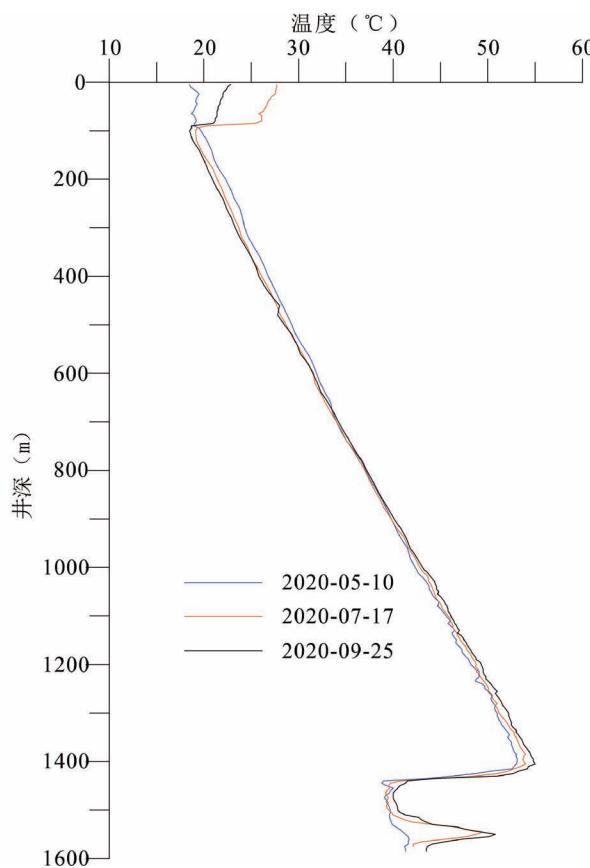
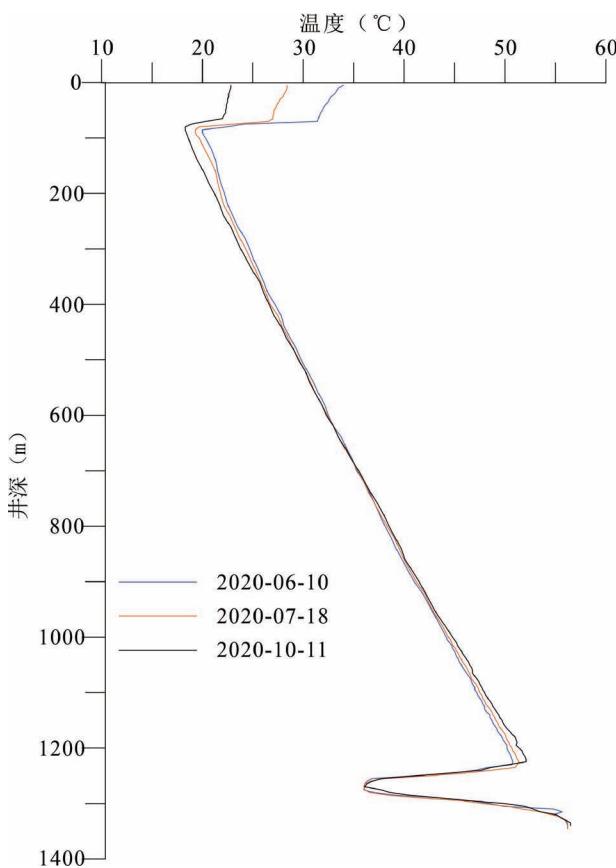
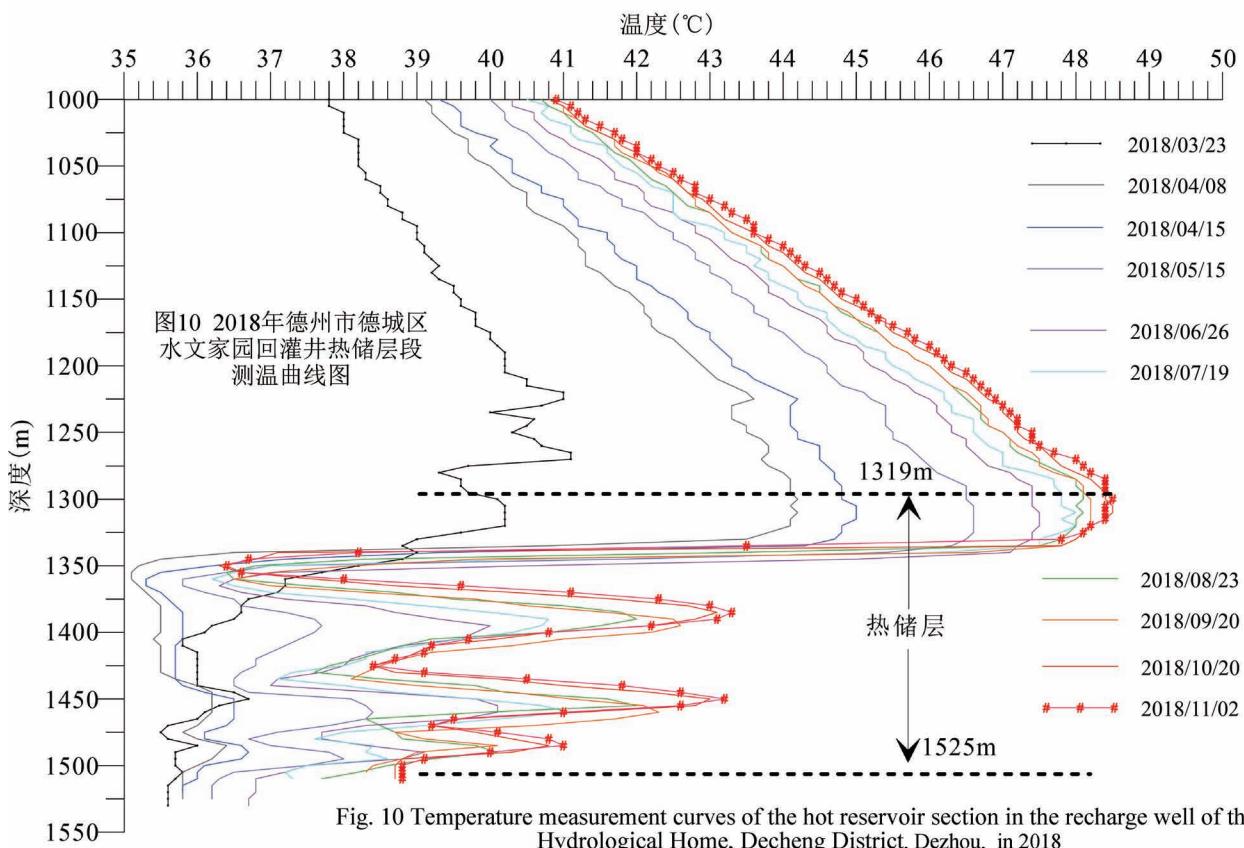
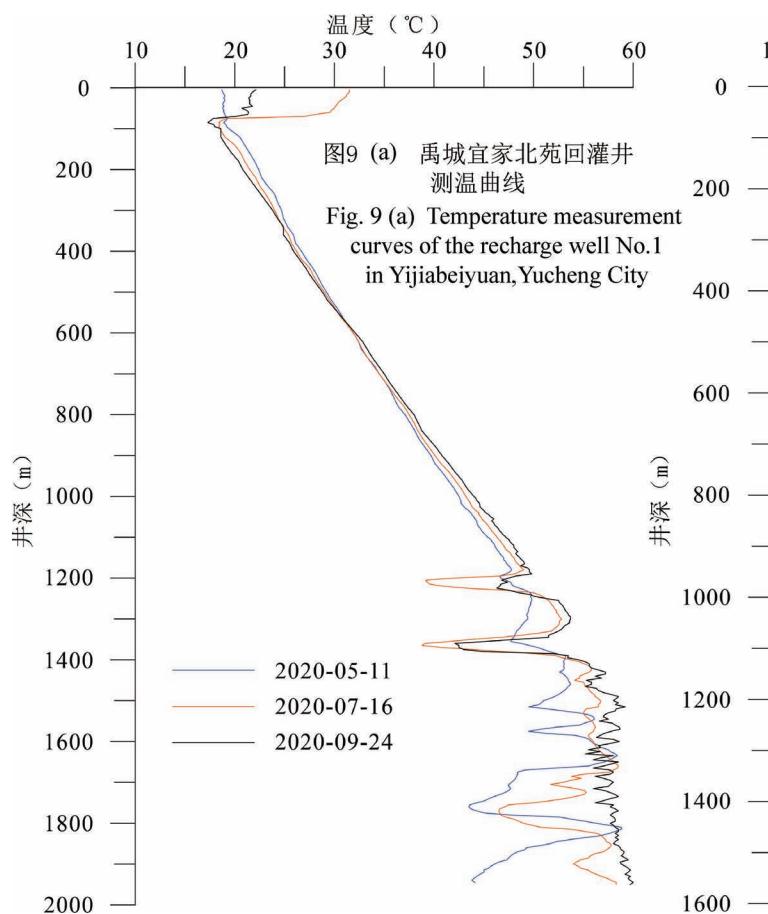


图 8 德州市陵城区郑家寨镇回灌 2 井(a)和武城县宏图嘉苑回灌 2 井(b)测温曲线图

Fig. 8 Temperature measurement curves of recharge well No. 2 in Zhengjiazhai Town, Lingcheng District, Dezhou (a) and recharge well No. 2 in Hongtuijiayuan, Wucheng County, Dezhou (b)



(2) 均匀增温段,自85 m处为地热水冷水头,温度约为19~24 ℃,由此向下地温随深度的增加而递增,不同时间所得曲线在600~800 m深度左右有个交点,不同回灌井测温曲线交点位置有所差别,相同的是,在交点之上,相同深度处温度随时间延续而降低,交点之下则随时间延续而升高,交点附近温度基本保持不变。这是因为地热尾水回灌影响了回灌井周边的地温场,使得地层温度大体和回灌水温度一致,停止回灌后,受外围地层热传导等作用的影响,回灌井周边地温逐渐恢复,趋于和原始地层温度一致。交点之上地层原始温度小于回灌水温度,因此停止回灌后温度逐渐降低,交点之下正好相反,而交点附近地层原始温度与回灌水温度大体相同,因此基本保持稳定不变。基于该特征,我们也可以通过测温曲线交点温度推测回灌水温度。

(3) 温度波动段,该段是主要回灌区段,几乎包含了整个回灌层位。本段整体温度显著低于非回灌段底部温度,至最后一次观测最高温度也未恢复到

热储温度。各次测量井温曲线并非如以上各段总体表现为随深度增加而升高或降低,而是表现为波动,同一深度的温度随时间延续逐步回升,但升温速率有所不同,2020年度水文家园回灌井升温速率为0.01 ℃/d,郑家寨镇回灌井升温速率为0.01 ℃/d,宏图嘉苑回灌井升温速率为0.017 ℃/d,宜家北苑回灌井升温速率为0.037 ℃/d,凯旋广场回灌井升温速率为0.016 ℃/d,这几个工程升温速率的差异性主要与回灌年度、回灌量、地层有关。

较其他回灌井温度变化曲线,宜家北苑回灌井曲线垂向规律性较差,经分析,可能存在三方面的原因:①回灌1井回灌量相对较少;②本工程回灌段垂向分布较长,为1192.50~1888.90 m,总长将近700 m,其他工程只有不到200 m,从而使回灌水在垂向每层进入的量较为分散,有利于温度恢复;③本回灌井底层温度相对较高,如附近开采1井在1870 m左右温度达到了71.8 ℃,回灌井底部温度将更高,回灌冷水进入后将很快被加热。因此,本工程回灌井

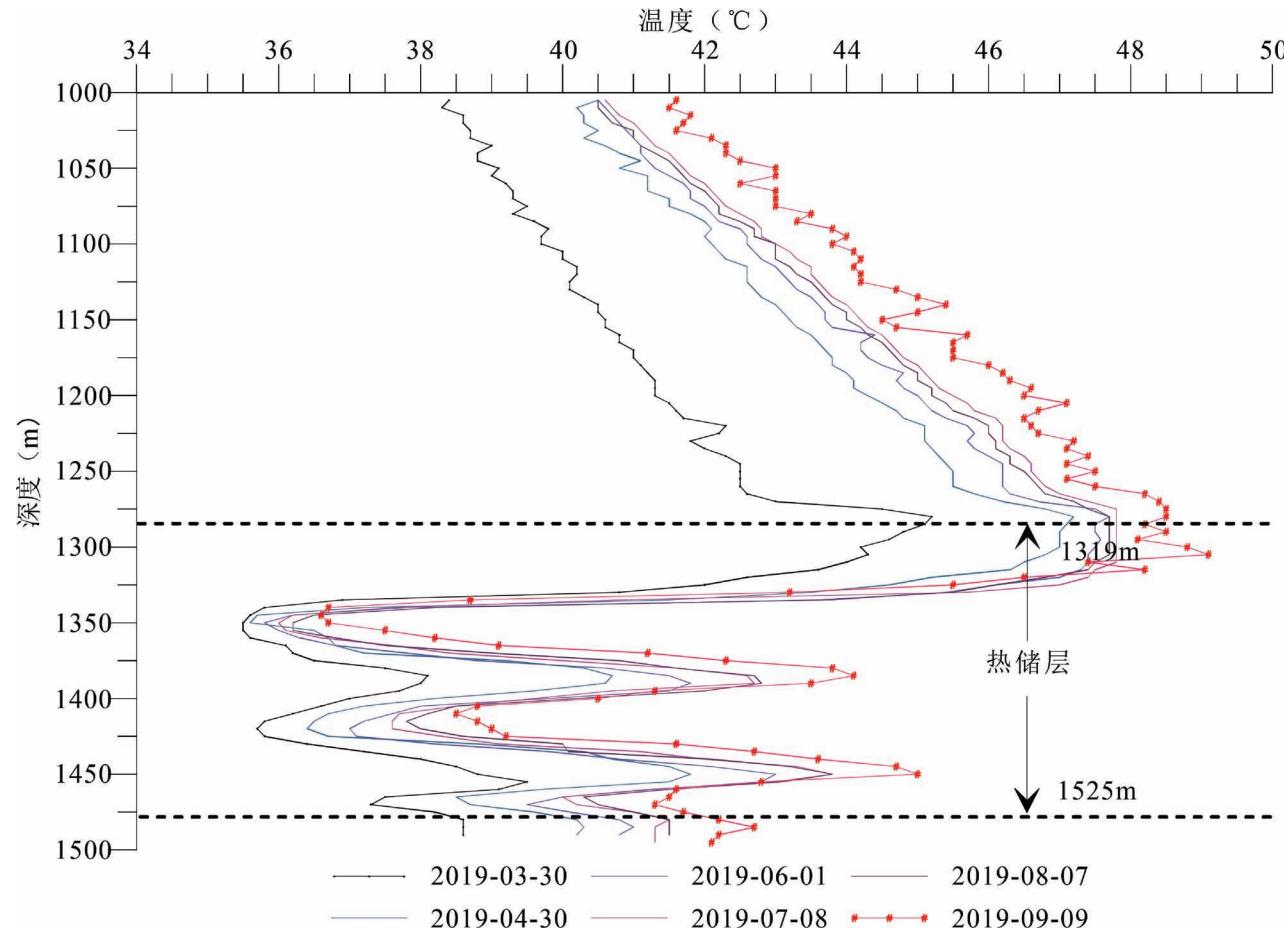


图11 2019年德州市德城区水文家园回灌井热储层段测温曲线图

Fig. 11 Temperature measurement curves of the hot reservoir section in the recharge well of the Hydrological Home, Decheng District, Dezhou, in 2019

温度恢复较快。

此外,通过对比水文家园回灌井不同年度测温曲线,回灌段测温曲线并非表现为随深度增加而上升或降低,而表现为波动,并且随着年内温度恢复时间的延续,波动幅度越来越大(图 10、图 11),但随着回灌的持续进行,2020 年度曲线波动幅度变小(图 12),即回灌段极大值与极小值的差变小,究其原因主要是,回灌井已回灌四个供暖季,冷却场范围逐渐扩大,水平方向上的热量补给路径变长,温度恢复速度因而变缓。本年度回灌层段平均水温恢复速率约 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,小于 2019 年度升温速率 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,主要原因是回灌水与回灌井底部温差变小,导致温度恢复速度较慢,预计至下年度温度恢复速率将更小。

3.2 开采井地温场变化特征分析

根据测温结果,分别绘制了不同工程回灌井垂向温度变化曲线(图 13 至图 15),根据温度变化整

体特征,自井口至井底可分为两段:均匀变温段、均匀增温段。

均匀变温段与回灌井类似,主要受气温控制,在此不再赘述。均匀增温段主要与地温梯度有关,多次测温结果绘制的曲线基本重合,变化不大,本次重点分析热储层温度变化。

根据对比分析发现,部分工程开采井热储段非供暖季温度处于上升状态,如水文家园工程开采井热储层各次测温平均水温分别为 $53.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $54.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $54.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $54.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $54.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $54.39\text{ }^{\circ}\text{C}$,呈缓步回升的趋势(图 16、17),非供暖季开采井热储层平均水温共回升 $1.09\text{ }^{\circ}\text{C}$,月平均升温速率为 $0.136\text{ }^{\circ}\text{C}$,距离较近的观测井水温在回灌前温度最高,平均水温 $56.08\text{ }^{\circ}\text{C}$,回灌中期水温 $54.81\text{ }^{\circ}\text{C}$,回灌水温 $55.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表 3)。根据郑家寨镇开采井不同时间测温曲线发现,年际相同或邻近月份的测温曲线基本相同,说明开采井温度年际变化不大。在同一年份

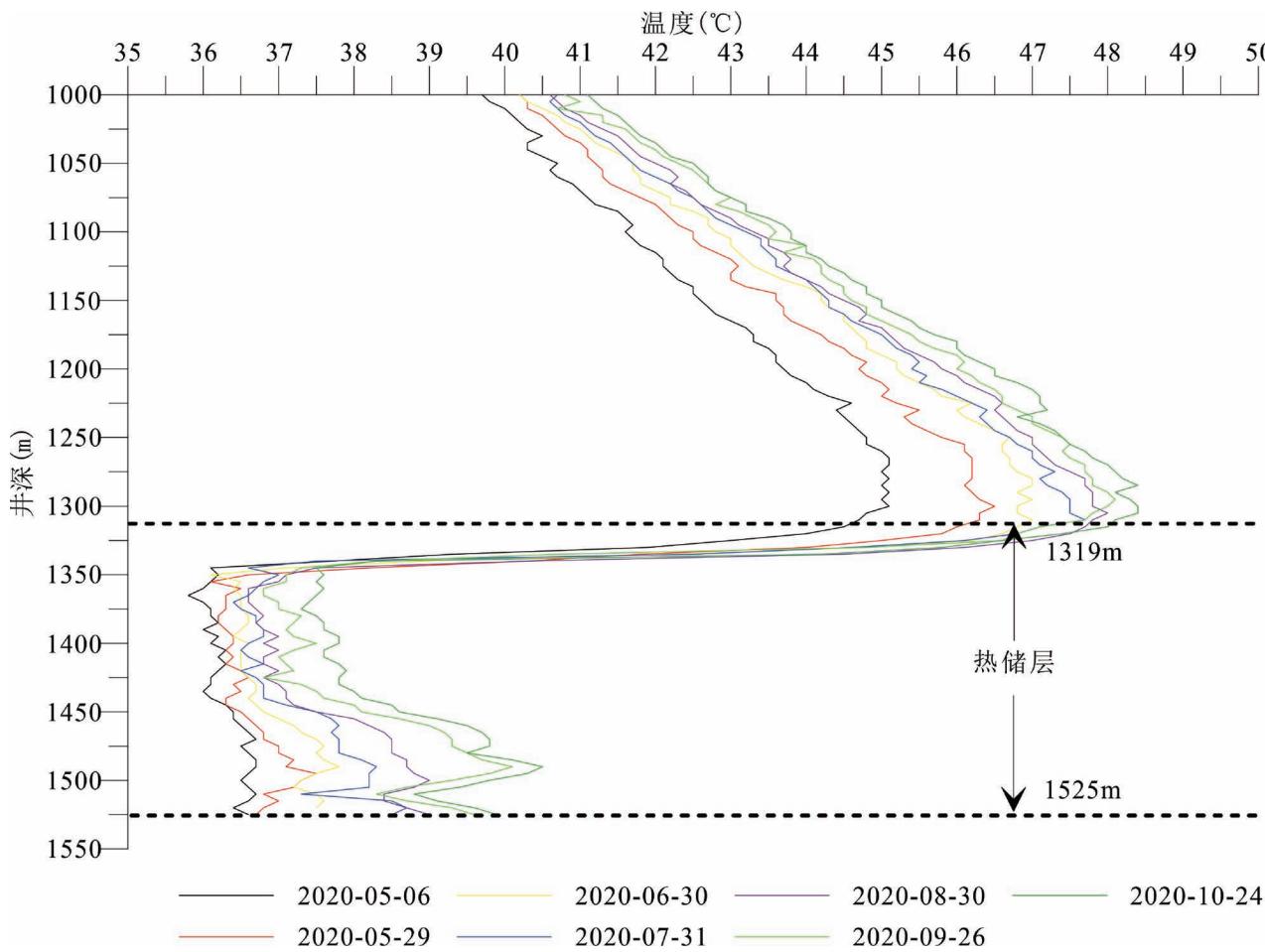


图 12 2020 年德州市德城区水文家园回灌井热储层段测温曲线图

Fig. 12 Temperature measurement curves of the hot reservoir section in the recharge well of the Hydrological Home, Decheng District, Dezhou, in 2020

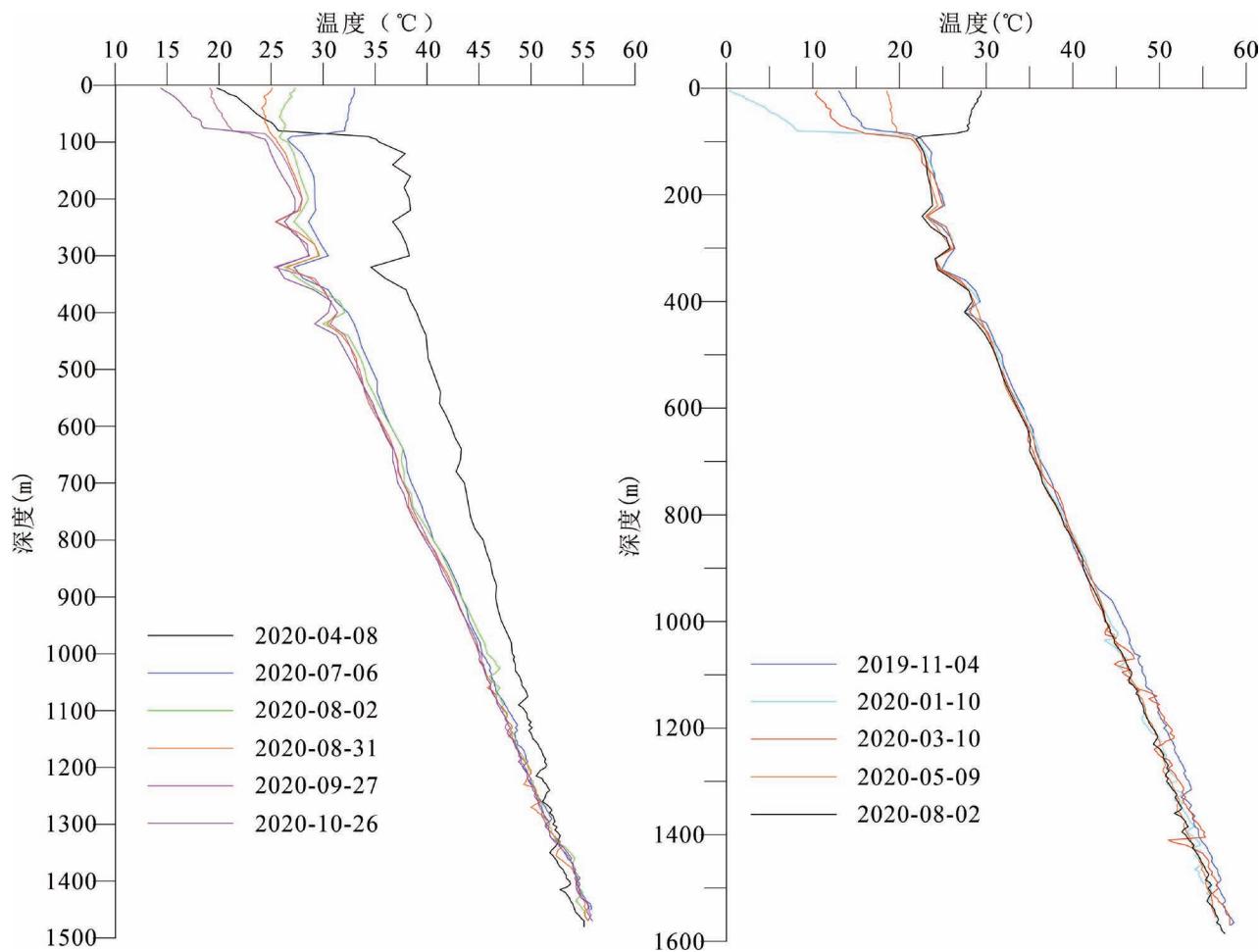


图 13 德州市德城区水文家园开采井(a)与观测井(b)测温曲线

Fig. 13 Temperature measurement curves of themining well (a) and observation well (b) in the Hydrological Home, Decheng District, Dezhou

中,回灌结束后,开采井热储段温度有缓慢升高的趋势,直至经历一个回灌期后温度有所降低,如此循环,2019年7月至10月热储段平均温度上升了0.40℃,经过一个供暖季后,下降后又进行回升,至2020年6月回升至56.40℃,至2020年10月回升至56.78℃(表4)。凯旋广场开采井热储段平均温度由60.18℃(5月21日)升高至60.37℃(10月15日),升高了0.19℃,热储层之所以呈现这样的规律,主要是由于供暖季回灌井冷水的注入,较短时间内已经对开采井温度造成了影响,即已经发生了热突破。

其他工程开采井热储段测温曲线基本重合,说明开采井受回灌冷水影响较小,经过分析主要存在以下原因:①采灌井距较大,如宏图嘉苑采灌工程,开采2井与最近回灌井间距为326 m,开采井热储段测温结果基本未发生变化;②回灌量较少、回灌底

部温度较高,如宜家北苑采灌工程,根据上述分析,回灌1井单层回灌量较少,温度恢复快,即使采灌井间距只有不到100 m,回灌冷水对开采井影响仍较小。

此外,凯旋广场开采井在1500 m左右温度有突然降低的现象,经分析是由于开采井与回灌井距离较小,只有100 m左右,回灌冷水容易对开采井造成影响,推测1500 m左右地下水流动性较强,对开采井温度影响明显。通过对凯旋广场与水文家园开采井温度变差情况,发现相同时间内凯旋广场开采井温度变差小于水文家园开采井,主要是因为凯旋广场地热井底部温度高于水文家园,温度补给较强,冷水影响范围较小,导致开采井温度变差较小。

4 热储温度恢复来源分析

刘志涛等(2019)以德城区水文家园采灌工程

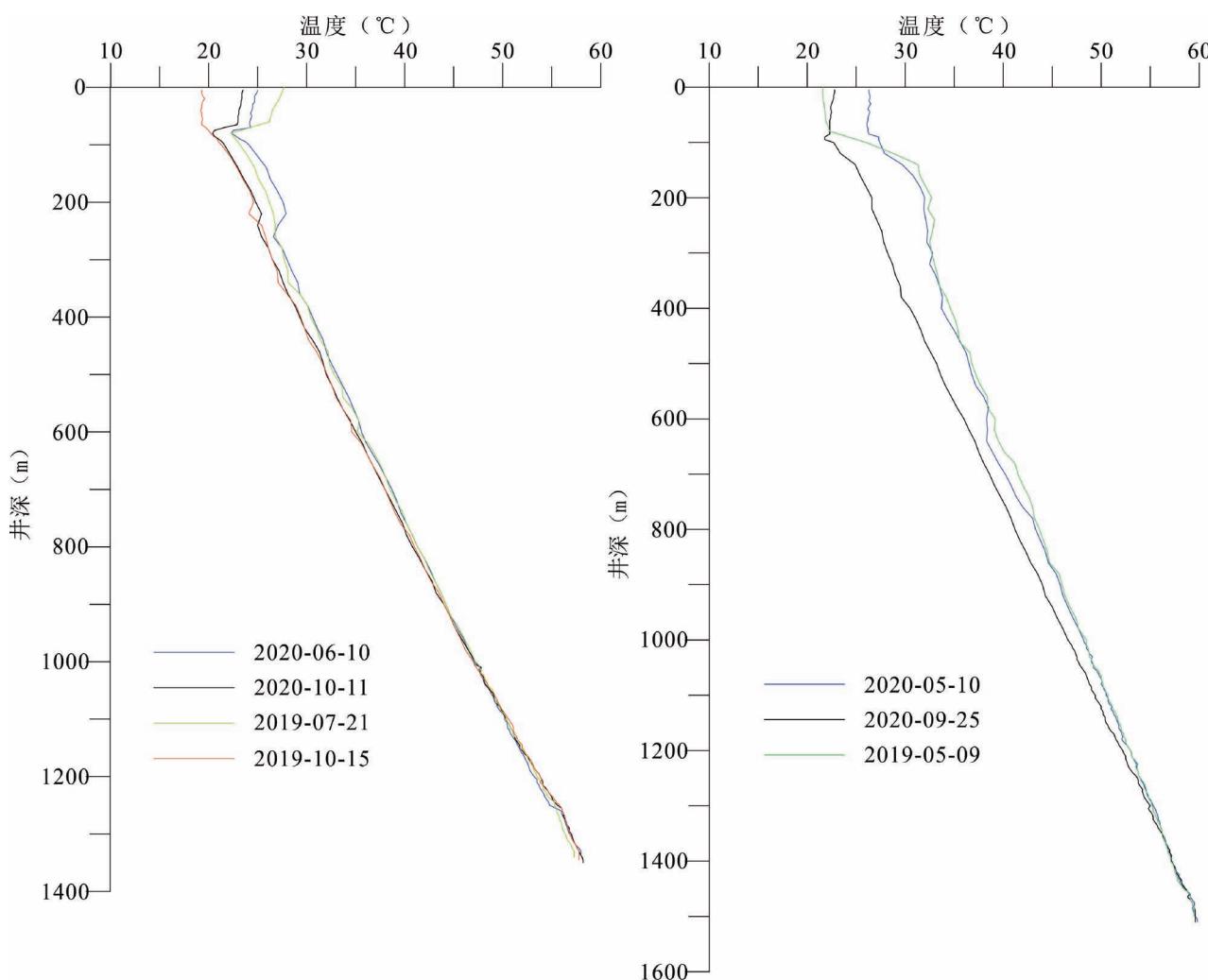


图 14 德州市陵城区郑家寨镇开采 2 井(a)和德州市武城县宏图嘉苑开采 2 井(b)测温曲线图

Fig. 14 Temperature measurement curves of mining well No. 2 in Zhengjiazhai, Lingcheng District, Dezhou (a) and mining well No. 2 in Hongtuijiayuan, Wucheng County, Dezhou (b)

为例对回灌条件下热储温度恢复来源进行了分析,认为底部大地传导热流和顶部地层传导热流在热储温度恢复中的作用及其微弱,周边同层相对高温地层传导的热量和热对流带来的热量是其温度恢复的主要热量来源,并定性分析了得出热对流补给的热

量在热储温度恢复中占主导作用。本次根据 2020 年测温数据,对热对流补给热量所占主导作用进行了补充分析。

本次统计了 2018 年与 2020 年 1270~1310 m 和 1375~1505 m 两个典型区间的井内测温数据,两个统计区间分别位于非回灌段和回灌段,但均避开了非回灌段和回灌段结合部位地层温度互相影响较大的区段,且其深度较为接近,地层热物性等特征相似。2018 年 1270~1310 m 区间第一次测温平均温度为 44.03 °C,最后一次(208 d)为 48.31 °C,升高了 4.28 °C。1375~1505 m 区间第一次测温平均温度

表 3 德州市德城区水文家园观测井测温基本信息表

Table 3 Basic information table of temperature measurement of observation well in Hydrological Home, Decheng District, Dezhou

水温	日期				
	2019-11-04	2020-01-10	2020-03-10	2020-05-09	2020-08-02
热储层温度(℃)	53.4~58.6	52.6~56.8	51.0~58.1	52.0~56.4	51.7~57.0
平均水温(℃)	56.08	54.81	55.60	54.50	54.71

表 4 德州市陵城区郑家寨镇开采 2 井测温基本信息表

Table 4 Basic temperature measurement information of the Mining Well No. 2 in Zhengjiazhai, Lingcheng District, Dezhou

水温	日期			
	2019-07	2019-10	2020-06-10	2020-10-11
热储层温度(℃)	55.0~57.3	55.3~57.8	54.5~58.0	55.1~58.2
平均水温(℃)	56.20	56.60	56.40	56.78

为 35.79 ℃, 最后一次为 40.68 ℃, 升高了 4.85 ℃。2020 年 1270~1310 m 区间第一次测温平均温度为 44.99 ℃, 最后一次(171 d)为 48.22 ℃, 升高了 3.23 ℃。1375~1505 m 区间第一次测温平均温度为 36.34 ℃, 最后一次为 38.62 ℃, 升高了 2.29 ℃(表 5)。

两者相比, 2018 年非回灌段增温略高一些, 由于回灌期间非回灌段主要通过井壁热传导影响周边

地温场, 因此影响范围相对较小。而回灌段低温地热水直接进入地层, 影响范围要大得多, 所以推测水平方向上温度梯度前者大于后者。前者温度恢复热量来源主要为周边同层相对高温地层传导的热量, 假如后者温度恢复热量主要来源相同, 那么前者温度恢复应该更快一些, 但测温结果正好相反, 所以推测 1375~1505 m 区段还有其他热源补给, 即地热水流动带来的热量。另外, 1270~1310

m 区间不同深度增温幅度较为均匀, 均在 4.2~4.3 ℃, 说明热传导作用是比较均匀的; 而 1375~1505 m 区间最小增温幅度 2.8 ℃, 最大 7.8 ℃, 差别巨大, 仅靠热传导不会造成如此大的差异, 所以推测地下水流动带来的热量也在其温度恢复中发挥有重要作用, 甚至可能发挥着主导作用。

根据上述可知 2020 年冷水范围较大, 回灌井热量补给路径变长, 温度恢复量较小, 通过对比非回灌

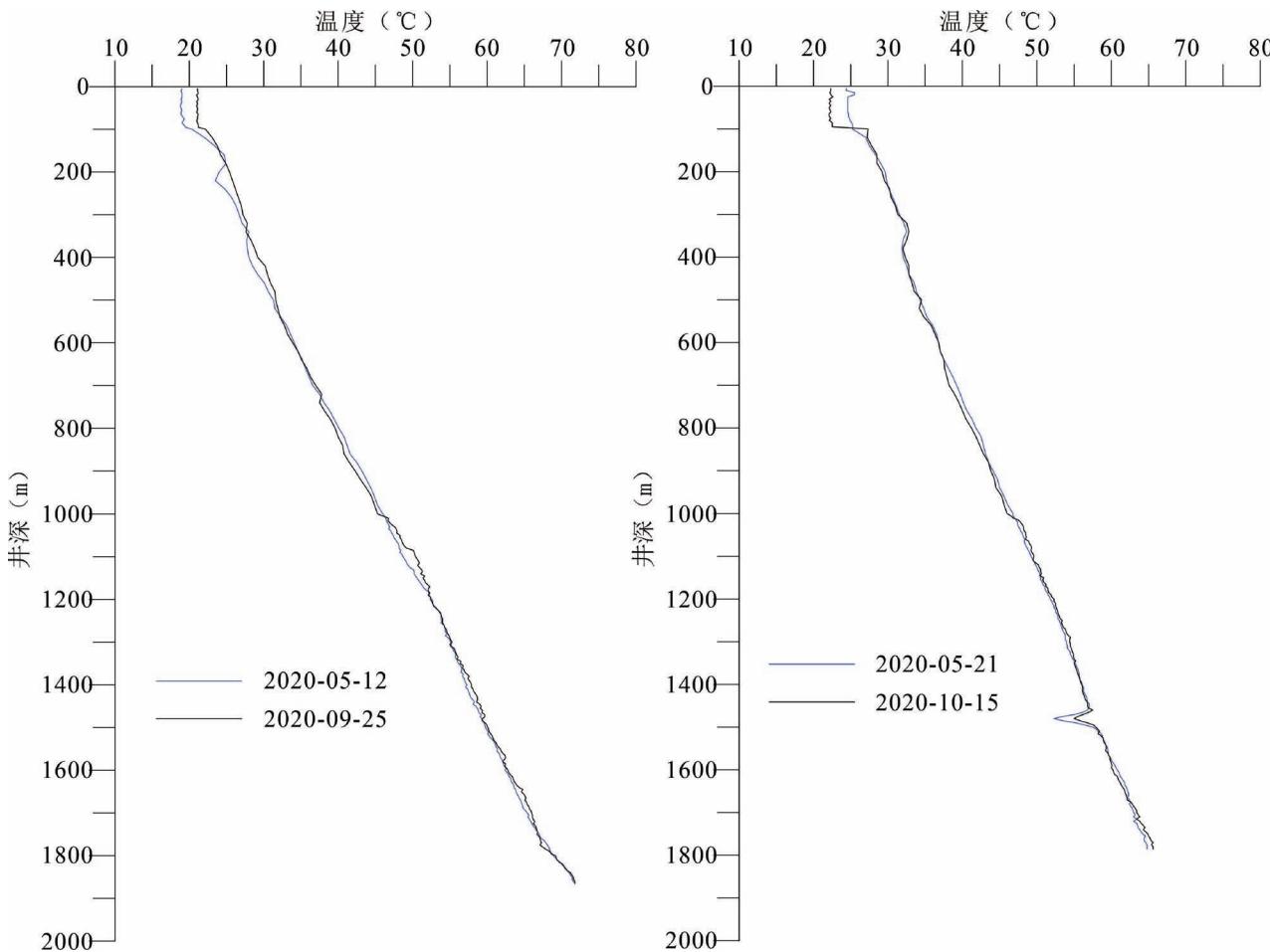


图 15 禹城市宜家北苑开采 1 井(a)和东营市垦利区凯旋广场开采井(b)测温曲线

Fig. 15 Temperature measurement curves of mining well No. 1 in Yijabeyuan, Yucheng City (a) and mining well in Kaixuan Square, Kenli District, Dongying (b)

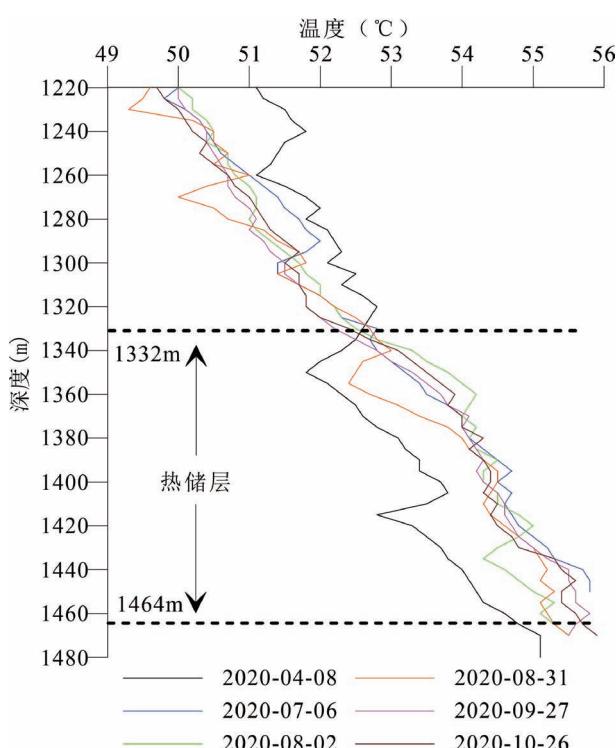


图 16 德州市德城区水文家园开采井热储层段测温曲线
Fig. 16 Temperature measurement curves of hot reservoir section in the mining well of Hydrology Home, Decheng District, Dezhou

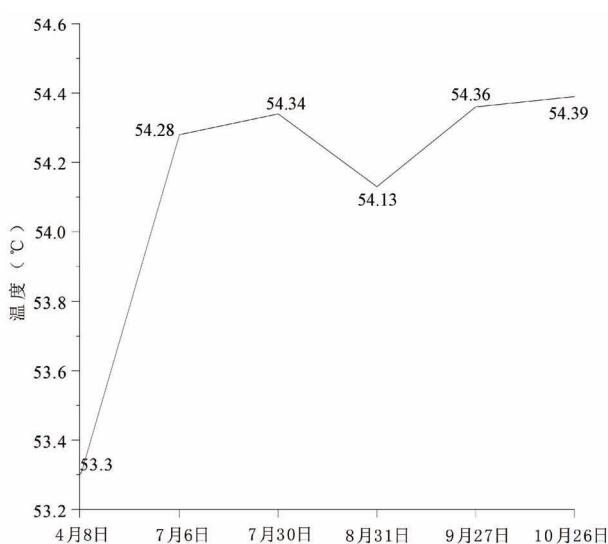


图 17 德州市德城区水文家园开采井热储层段平均温度变化曲线图

Fig. 17 Average temperature variation curve of the hot reservoir section in the mining well of Hydrology Home, Decheng District, Dezhou

表 5 德州市德城区水文家园回灌井不同年份不同层段测温情况一览表

Table 5 Table of temperature measurement in different layers of recharge wells in Hydrological Home, Decheng District, Dezhou in different years

时段(m)	时间	平均温度(℃)	增温(℃)
1270~1310	2018-04-08	44.03	4.28
	2018-11-02	48.31	
1375~1505	2018-04-08	35.79	4.85
	2018-11-02	40.68	
1270~1310	2020-05-06	44.99	3.23
	2020-10-24	48.22	
1375~1505	2020-05-06	36.34	2.29
	2020-10-24	38.62	

段与回灌段增温可知,非回灌段平均增温量大于回灌段的平均增温量,可知随着回灌年度的增加,热对流补给的主导作用逐渐减弱,周边同层相对高温地层传导的热量逐渐成为主要的热量恢复来源。

综上,回灌条件下,在回灌初期热对流在热量恢复中占主导作用,随着回灌年度的增加,冷水范围越来越大,热对流对温度恢复的主导作用逐渐减弱,周边同层相对高温地层传导的热量在温度恢复中的作用越来越强,温度恢复的程度也越来越小,因此,在规模化回灌条件下,热突破是必然的。

5 结论

本文主要通过砂岩热储不同采灌工程测温数据,分析了开采井、回灌井垂向地温场变化规律及原因,发现随着回灌年限的增大,热储层对回灌冷水热量的有效补给越来越小,当采灌井距较小时,短时间内会对开采井水温造成影响,并且随着回灌年限的增加,影响程度也越来越大,致使地热资源品质不断降低,最终可能会对供暖效果造成影响,因此,在进行地热采灌工程建设时,应注重合理采灌井距的布设。但由于本次监测周期较短,数据较少,结论仍需在今后实际工作中进行验证。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

冯守涛,王成明,杨亚宾,宋伟华,刘帅,赵季初. 2019. 砂岩热储回灌对储层影响评价——以鲁西北坳陷地热区为例. 地质学报, 93 (S1): 158~167.

龚育龄,王良书,刘绍文,李成,韩用兵,李华,刘波,蔡进功. 2003. 济阳坳陷大地热流分布特征. 中国科学(D辑:地球科学), 33 (4): 384~391.

- 何满潮,刘斌,姚磊华,徐能雄. 2003. 地热单井回灌渗流场理论研究. 太阳能学报, 24(2): 197~201.
- 康凤新,张忠祥,徐军祥,王彦俊,赵季初. 2013. 山东省地热地质条件及开发利用. 科学开发中国地热资源高层研讨会论文集: 79~83.
- 康凤新. 2018. 山东省地热清洁能源综合评价. 北京:科学出版社: 1~14.
- 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.
- 刘志涛,刘帅,宋伟华,杨询昌,周群道. 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.
- 陶虹,丁佳. 2014. 关中城市群开采地下水有关环境地质问题及其防治对策建议. 地质论评, 60(1): 231~235.
- 王学鹏,刘欢,蒋书杰,邓荣庆. 2020. 沉积盆地砂岩热储回灌试验研究——以山东禹城市为例. 地质论评, 66(2): 485~492.
- 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.
- 吴立进,赵季初,李艾银,邢生霞. 2016. 鲁北坳陷区地热资源开发利用关键性问题研究. 地质与勘探, 52(2): 300~306.
- 颜世强,潘懋,邹祖光,刘桂仪. 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,康凤新,王学鹏,付庆杰,刘志涛. 2019. 砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理——鲁北馆陶组热储典型案例. 地质学报, 93(3): 738~750.
- 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. 北京:地质出版社: 169~175.
- 朱家玲,朱晓明,雷海燕. 2012. 地热回灌井间压差补偿对回灌效率影响的分析. 太阳能学报, 33(1): 56~62.
- Axelsson G, Stefansson V, Xu Y. 2002. Sustainable management of geothermal resources. In: Liu Jiurong, ed. Proceedings 2002 Beijing International Geothermal Symposium, Beijing, China, 29~31: 277~283.
- Feng Shoutao, Wang Chengming, Yang Yabin, Song Weihua, Liu Shuai, Zhao Jichu. 2009&. Impact assessment of reinjection on sandstone geothermal reservoir; a case study of Northwest Shandong depression. Acta Geologica Sinica, 93(S1): 158~167.
- Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, Li Cheng, Han Yongbing, Li Hua, Liu Bo, Cai Jingong. 2003&. Distribution characteristics of geothermal flow in Jiyang Depression. Science in China (Series D), 33(4): 384~391.
- He Manchao, Liu Bin, Yao Leihua, Xu Nengxiong. 2003&. Study on the theory of seepage field for geothermal single well reinjection. Acta Energiae Solaris Sinica, 24(2): 197~201.
- Kang Fengxin. 2013. Sustainable yield and its assessment of geothermal reservoirs in China. GRC Transactions, 37(4): 843~852.
- Kang Fengxin, Zhang Zhongxiang, Xu Junxiang, Wang Yanjun, Zhao Jichu. 2013&. Geothermal geological conditions and exploitation and utilization in Shandong Province. High Level Seminar Proceedings on Scientific Development of Chinese Geothermal Resources, 79~83.
- Kang Fengxin. 2018#. Assessment of Geothermal Resources in Shandong Province. Beijing: Science Press, 1~14.
- Liu Guiyi. 2001#. Basic characteristics and water environment problems of deep groundwater in northern Shandong plain. Shandong Geological, 17(5): 43~47.
- Liu Zhitao, Liu Shuai, Song Weihua, Yang Xunchang, Zhou Qundao. 2019&. Analysis of change characteristics on geothermal field for geothermal return water reinjection of sandstone reservoir in the Lubei. Acta Geologica Sinica, 93(S1): 149~157.
- Rybach L, Megel T, Eugster W J. 1999. How renewable are geothermal resources? Transactions, Geothermal Resources Council, 23: 17~20.
- Sullivan M O, Manning W. 2005. Renewability of the Wairakei Tauhara geothermal resource. Proceedings World Geothermal Congress.
- Tao Hong, Ding Jia. 2014&. Groundwater environmental geological problems and preventive treatment in Guanzhong urban agglomeration. Geological Review, 60(1): 231~235.
- Wang Xuepeng, Liu Huan, Jiang Shujie, Deng Rongqing. 2020&. Reinjection experimental research on sedimentary basin sandstone reservoir——A case study of Yucheng City, Shandong. Geological Review, 66(2): 485~492.
- Wang Yanjun, Liu Guiyi, Hu Songtao. 2008&. Study on geothermal resources zoning in northern Shandong. Geological Survey and Research, 31(3): 270~277.
- Wu Lijin, Zhao Jichu, Li Aiying, Xing Shengxia. 2016&. Key issues of geothermal resource exploitation and utilization in the depression Area of northern Shandong province. Geology and Exploration, 52(2): 300~306.
- Yan Shiqiang, Pan Mao, Zou Zuguang, Liu Guiyi. 2007&. Geochemical characteristics and genesis of underground hot water in Dezhou depression of Shandong Province. Geology in China, 34(1): 149~152.
- Yang Xunchang, Kang Fengxin, Wang Xuepeng, Fu Qingjie, Liu Zhitao. 2019&. Hydrochemical features of geothermal reservoir geotemperature field in sandstone porosity and enrichment mechanism of geothermal water; a case study of geothermal reservoir of Guantao Formation in the Lubei. Acta Geologica Sinica, 93(3): 738~747.
- Zhou Shaozhi, Zou Zuguang, Chuai Yunxiang. 2007#. Geological characteristics and exploration, development and utilization analysis of geothermal field in North Shandong Province. Environmental Geology Anthology of Shandong Province. Beijing: Geological Publishing House 169~175.
- Zhu Jialing, Zhu Xiaoming, Lei Haiyan. 2012&. Analysis of impact of pressure compensation between geothermal wells on rejection efficiency. Acta Energiae Solaris Sinica, 33(1): 56~62.

Effect of heating tail water recharge on geothermal field of sandstone heat storage: A case study in northern Shandong Province

LIU Shuai^{1,2)}, LIU Zhitao^{1,2)}, FENG Shoutao^{1,2)}, WANG Xuepeng^{1,2)}, BAI Tong^{1,2)},
MA Xuemei³⁾, WANG Huafei⁴⁾

- 1) *The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou, Shandong, 253072;*
- 2) *Shandong Provincial Research Center of Geothermal Resources and Reinjection, Dezhou, Shandong, 253072;*
- 3) *Hydrogeology and Environmental Geology Surveying Center of China Geological Survey, Baoding, Hebei, 071051;*
- 4) *Zhongke Hualu Soil Remediation Engineering Co. Ltd., Dezhou, Shandong, 253072*

Abstract: In order to ensure the sustainable development and utilization of geothermal resources, it is of great concern in the field of geothermal to carry out in-depth research on reasonable distance between production and reinjection wells in recharge engineering and prevent thermal breakthrough in a short time. Based on the temperature measurement results of the whole well, the variation characteristics of geothermal field in different mining and irrigation projects of sandstone heat storage are analyzed in this paper. The results show that with the increase of recharge years, the range of cold water becomes larger, the effective recharge path of heat to the recharge well becomes longer, and the fluctuation range of the temperature curve of the heat reservoir of the recharge well becomes smaller. When the distance between the production and irrigation wells is small and the bottom temperature is relatively low, the recharge cold water will affect the production wells, resulting in the decrease of the heat storage temperature of the production wells. Heat convection plays a leading role in heat recovery at the initial stage of recharge, and with the increase of recharge years, cold water range becomes larger, the effect of heat convection on the recovery of temperature field is weakened gradually; Meanwhile, The heat conduction of the surrounding and adjacent impervious layers plays an increasingly significant role in temperature recovery, and the temperature recovery becomes slower, therefore, under the condition of large-scale recharge, thermal breakthrough is inevitable.

Keywords: geothermal return water reinjection; sandstone reservoir; geothermal field

Acknowledgements: This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42072331), Shandong Geological Research Project ([2020]4, No. 202016) and China Geological Survey (No. DD20190259)

First author: LIU Shuai, male, born in 1989, bachelor, engineer, is mainly engaged in geothermal geology; Email: 332182068@qq.com

Corresponding author: MA Xuemei, female, born in 1990, master, engineer, majors in groundwater science and engineering, is mainly engaged in hydrogeological research; Email: 247523354@qq.com

Manuscript received on: 2020-11-27; **Accepted on:** 2021-05-18; **Network published on:** 2021-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.07.013

Edited by: ZHAO Xue, ZHANG Yuxu