

砂岩热储回灌对储层影响评价

——以鲁西北拗陷地热区为例

冯守涛^{1,2)}, 王成明^{1,2)}, 杨亚宾^{1,2)}, 宋伟华^{1,2)}, 刘帅^{1,2)}, 赵季初^{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), 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

内容提要: 地热流体经供暖利用后尾水温度降低, 经过滤、排气处理后的尾水中仍含有不同粒径的悬浮物、气体, 因此回灌不可避免的会对储层造成负面影响, 如堵塞储层导致回灌量衰减、热储温度降低甚至产生热突破等, 这严重阻碍了地热回灌的长期可持续运行。评价回灌对储层的影响, 对下一步全面推进、科学回灌及合理可持续开发利用、保护地热资源具有重要意义。本文以近几年鲁西北拗陷区开展的馆陶组热储回灌试验为基础, 设立了一套评价指标, 即用回灌前、后水质的变化率评价回灌对热储流体的影响, 温度的变化率评价回灌对热储温度的影响, 单位涌水量变化率、渗透系数的比值和单位回灌量比值评价回灌堵塞程度并确定了分级标准。评价结果表明, 回灌不会改变储层流体的化学类型; 回灌堵塞主要发生在回灌井周围, 相比回灌前, 回灌后回灌井的单位涌水量降低 14.3%~59.0%、渗透系数为原来的 41%~86%, 末期单位回灌量为初期回灌量的 51%~92%, 回灌堵塞程度为轻度到严重。采灌井距 180~500m, 历经一个供暖季回灌对热储温度的影响较小, 但回灌导致回灌井周边热储温度明显降低, 历经一个非回灌期 224d, 从 35.7℃ 恢复到 40.53℃, 恢复速率为 0.036~0.022℃/d, 还需 658d 才能恢复到原热储温度(55℃)。本区热储水位仍呈下降趋势, 但回灌可延缓热储水位的下降速度。

关键词: 砂岩热储; 回灌; 影响评价; 鲁西北拗陷地热区

鲁西北拗陷地热区位于山东省西北部(图 1), 行政区划包括德州、滨州、东营和聊城大部分地区及济南北部、菏泽西部地区。该区地热资源丰富, 为典型的传导型砂岩孔隙热储。自 20 世纪 90 年代开始大规模开发利用, 目前开发利用的主要层位为馆陶组、东营组砂岩热储。主要用于供暖, 供暖期地热水开采量达 $94.30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (Kang Fengxin et al., 2018), 折合标准煤 $116.32 \times 10^4 \text{ t}$, 供暖面积 $5636 \times 10^4 \text{ m}^2$; 其次是洗浴与疗养、种植、养殖 (Kang Fengxin et al., 2008), 取得了显著的社会、经济和环境效益。

该区地热资源埋深大, 天然条件下补给微弱, 长期集中区域、集中时段大量开采, 导致热储压力急剧下降 (Zhao Jichu, 2008; Zhang Pingping et al., 2015), 2017 年部分县(市)城区地热水漏斗中心水

位埋深一般超过 30m (Yang Xunchang et al., 2019), 最大降幅超过了 80m (图 2), 多年平均下降速率达 7.31m/a。地热回灌是解决上述问题的最有效的措施 (Liu Jiurong, 2003; Zhang Xinwen et al., 2009), 陕西、天津、河南、山东等地先后开展了砂岩热储地热回灌试验 (Yan Wenzhong et al., 2014; Ruan Chuanxia et al., 2017; Liang Jing et al., 2016; Zhou Shihan et al., 2009; Tan Zhirong, 2010; Zhang Pingping et al., 2015), 试验表明, 砂岩热储回灌在技术经济上是可行的, 研究认为物理堵塞是回灌堵塞的主要类型 (Dai Qun et al., 2017; Liu Xuelling et al., 2009), 是导致回灌量衰减的主要原因。成井结构是维持可持续回灌的关键, 完善的地面尾水处理设备可降低或避免物理和化学原因引起的堵塞。

注: 本文为山东省地质科研项目(编号鲁地字[2019]34 号文)资助的成果。

收稿日期: 2019-07-31; 改回日期: 2019-09-13; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 冯守涛, 男, 1978 年生。高级工程师, 主要从事地热地质勘查研究。Email: 515631333@qq.com。通讯作者: 王成明, 男, 1979 年生。高级工程师, 主要从事地热地质勘查研究。Email: 252913428@qq.com。

引用本文: 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——以鲁西北拗陷地热区为例. 地质学报, 93(s1): 158~167, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019223.
Feng Shoutao, Wang Chengming, Yang Yabin, Song Weihua, Liu Shuai, Zhao Jichu. 2019. Impact assessment of reinjection on sandstone geothermal reservoir: a case study of Northwest Shandong depression. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 158~167.

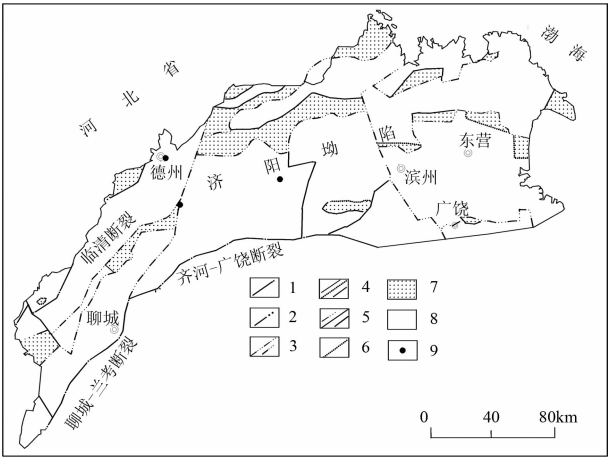


图 1 鲁西北拗陷地热区地质构造及回灌试验点简图
Fig. 1 Geological structure and reinjection site in geothermalzone of Northwest Shandong depression
1—二级单元界线;2—三级单元界线;3—四级单元界线;4—五级单元界线;5—断层及推测断层;6—不整合界线;7—凸起区 8—凹陷区;9—回灌试验位置
1—Secondary unit boundary; 2—tertiary unit boundary; 3—Quaternary unit boundary; 4—five stage unit boundary; 5—faults and speculative faults; 6—unconformity boundary; 7—uplifting area; 8—depression area; 9—reinjection test sites

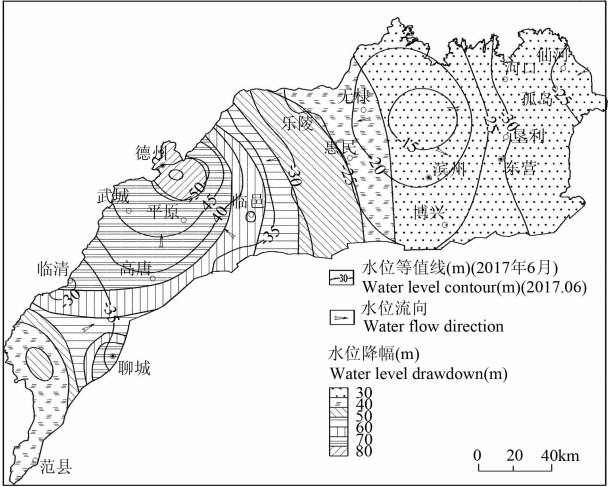


图 2 鲁西北拗陷地热区馆陶组热储地热水位降幅 (2005.6~2017.6) 及水位等值线图
Fig. 2 The geothermal water level drawdown zoning and contour in Guantao Formation reservoir of geothermal zone in Northwest Shandong depression

由于温度、压力特别是悬浮物含量的改变,地热回灌不可避免的会对储层造成负面影响,如堵塞储层导致回灌量衰减、热储温度降低甚至产生热突破等(Zeng Meixiang et al. ,2010;Liu Xueling et al. , 2009; Lin Jianwang et al. ,2006)。前人对鲁西北拗陷区地热回灌的研究主要侧重于回灌影响因素、

回灌工艺流程、钻完井工艺、尾水处理工艺、回灌堵塞机理与防治措施等方面,较少涉及回灌对储层的影响评价。正确评价回灌对储层的影响,对下一步全面推进、科学回灌及合理可持续开发利用、保护具有重要意义(Pritchett et al. ,1993; Megel et al. , 2000; Wright et al. ,1995; Rybach et al. ,2003)。本文以近几年开展的回灌试验、抽水试验、动态观测数据为基础,设立了一套评价指标,确定了分级标准,分析评价回灌对储层的影响程度,为回灌工程的长期可持续开发利用提供参考。

1 地质背景

1.1 地层

鲁西北拗陷区位于华北板块的东部,为平缓宽广的平原区,除在无棣大山、东阿南部、邹平等有残存的基岩出露外,其余均被第四纪沉积物覆盖(Xu Junxiang et al. ,2014)。自中新世以来,受差异性升降运动的影响,一直缓慢下沉,沉积了巨厚的新生代地层,自老至新有古近纪孔店组、沙河街组、东营组,新近纪馆陶组、明化镇组,第四纪平原组。古近系在凸起区缺失,新近系覆盖的基底地层主要有古近系、石炭-二叠系、寒武-奥陶系和太古宇泰山群变质岩系等。

1.2 构造

鲁西北拗陷区位于山东省西北部,西、南分别以聊城—兰考断裂、齐河—广饶断裂为界,与鲁西隆起区相邻,东、北、西三面至山东省界,在大地构造单元上属华北板块(Ⅰ级)、华北拗陷区(Ⅱ级)的济阳拗陷区(Ⅲ级)和临清拗陷区(Ⅲ级)(Liu Guiyi,2001; Yan Shiqiang et al. , 2007; Wang Yanjun et al. , 2008)。本区自中生代以来,受喜马拉雅运动与燕山运动的影响,断裂构造发育,形成凸凹相间的隆起与拗陷,在拗陷和隆起区内受断裂活动的影响和控制,又形成了众多的凸起与拗陷。

区内新近纪以来的断裂格架及活动特征,主要表现为断块运动和对古近纪及其前的构造继承性活动,区内对Ⅱ、Ⅲ级构造单元的分布、控热具有控制作用的断裂主要有聊城—兰考断裂带、齐河—广饶断裂带和沧东断裂。

1.3 热储层

鲁西北拗陷地热区地热流体主要赋存在古、新近纪砂岩孔隙-裂隙和古生代寒武-奥陶系碳酸盐岩岩溶-裂隙中,总体属沉积盆地型层状砂岩、碳酸盐岩热储(Kang Fengxin et al. ,2018),大地导热率为

主要热源,地表无热流显示,馆陶组砂岩热储是本区最具开发利用价值的热储(Gao Zongjun et al., 2009;Kang Fengxin et al., 2013),也是目前开展地热尾水回灌的主要目的层。

馆陶组热储除在乐陵南部缺失外,其余地区皆有分布。顶板埋深 1000~1400m(图 3),厚度 50~150m,与基底呈不整合接触,受区域构造和基底起伏的控制,凸起区埋藏浅、厚度薄,凹陷区埋藏深、厚度大。热储岩性主要为河流相、冲积扇相的细砂岩、粗砂岩、含砾砂岩、砂砾岩,砾石呈半圆状,磨圆度中等。热储孔隙度为 22%~32%,渗透率 $163\times 10^{-3}\sim 3058\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,单井出水量为 40~80m³/h,矿化度为 3.97~18.52g/L,由西向东逐渐增高,水化学类型以 Cl-Na 型为主。井口水温一般为 45~65℃,属低温地热资源、温水-热水型。

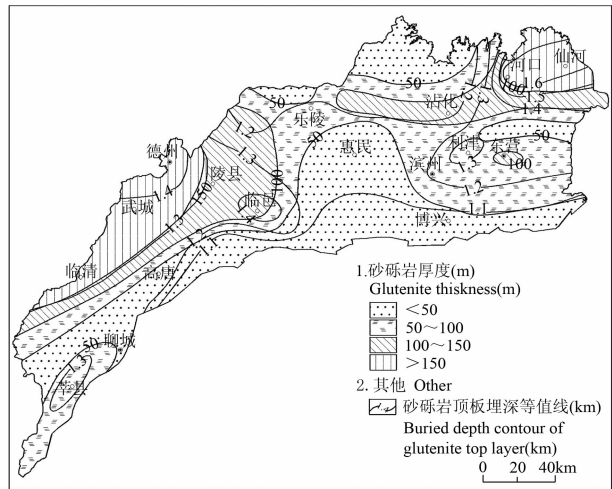


图 3 鲁西北拗陷地热区新近纪馆陶组砂砾岩厚度分区图
Fig. 3 The glutenite thickness zonation of the Neogene Guantao Formation in geothermal zone of Northwest Shandong depression

2 研究方法 及 数据分析

地热回灌原则上应为同层回灌,地热尾水的水质与热储层相差不大,但水温相差较大,所以地热尾水回灌至热储层后,可能会对热储层造成影响,为此需要开展回灌对热储层的影响评价。

2013~2018 年在鲁西北拗陷地热区的德城区、平原、商河等地开展了多组科研性回灌试验和生产性回灌试验,回灌井采用大口径填砾工艺成井,回灌水源为地热供暖尾水,回灌模式为同层对井馆陶组砂岩热储自然回灌,回灌工艺流程为密封、除砂、粗过滤(50μm)、精过滤(3~5μm)、排气,回灌水温为 25~35℃。试验过程中采用人工观测与自动观测相

结合的方法进行动态观测,观测内容包括开采量、回灌量、回灌水温、开采井井口水温与回扬水温、水位,同时在试验前后分别进行了非稳定流抽水试验,求取了水文地质参数,并采集水样进行了分析测试,取得了大量的第一手资料。

本次对上述回灌试验取得的测试数据进行统计分析,剔除异常后对所有数据进行归类整理,以馆陶组砂岩热储为例,建立一套评价指标体系(表 1),评价回灌对热储流体水质、热储温度的影响以及回灌堵塞程度,分析回灌对热储水位的影响。从储层的角度评价回灌工程的实施效果,为适时采取相应的技术手段减轻对储层的影响提供依据,以期更好的推进回灌工作的可持续运行。

表 1 砂岩热储回灌对储层影响评价指标体系
Table 1 Impact assessment index system of reinjection to sandstone geothermal reservoir

评价对象	评价指标
热储流体	回灌前后水质的变化率
回灌堵塞	单位涌水量变化率 渗透系数比值 单位回灌量比值
热储温度	温度变化率

3 回灌对热储流体的影响评价

3.1 评价指标

一般情况下,经除砂、过滤后地热尾水的水质应优于热储层水质,以防止回灌尾水对热储层地热流体造成不可逆转的有害影响。本次用回灌前、后水质变化率来评价回灌水质对热储流体的影响程度。

$$F_i = (F_{\text{指}} - F_{\text{始}}) / F_{\text{始}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: F_i 为回灌前后水质的变化率(无量纲); $F_{\text{指}}$ 为回灌后某元素的含量(mg/L); $F_{\text{始}}$ 为回灌前某同一元素的含量(mg/L)。

根据水质变化率大小,将回灌对热储层流体的影响程度分为大、中、小三级,分级标准如表 2 所示。

表 2 回灌对热储流体影响程度分级表
Table 2 Classification of influence degree of reinjection on thermal reservoir fluid

水质变化率 F_i	$\geq 20\%$	10%~20%	$\leq 10\%$
影响程度	大	中	小

3.2 回灌对储层流体影响分析

回灌对储层流体的影响取决于回灌水与储层流体水质间的差别。根据回灌前后水质的变化率(表

3)分析如下:

(1)回灌前后水化学类型不变,对主要元素 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 影响较小。回灌前后水学化类型均为 Cl-Na 型, Na^+ 的变化率为 $1.7\%\sim 8.2\%$, Cl^- 变化率为 $0.6\%\sim 7.0\%$, SO_4^{2-} 变化率 $0.2\%\sim 19.4\%$ 。

(2)回灌对成垢离子 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 的影响较

大。回灌前后 Ca^{2+} 的变化率为 $1.5\%\sim 5.7\%$,最大可达 $28.1\%\sim 60.1\%$, Fe^{3+} 变化率为 $33.3\%\sim 140\%$,最大达到 300% , Fe^{2+} 变化率为 100% 。这主要是因为回灌过程中不可避免的会带入空气,导致 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 含量增大,这也是导致回灌堵塞的主要原因之一。这也说明要对回灌尾水采取除铁、排气措施,防止产生化学堵塞和气体堵塞。

表 3 鲁西北坳陷区地热供暖尾水回灌前后主要元素含量对比表

Table 3 Contrast of major elements content of geothermal heating tailwater before and after reinjection in Northwest Shandong depression

位置	井别	项目	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	pH	矿化度
商河	回灌井	回灌前	15	3000	505	88.7	0.1	0.2	4856.7	888.6	140.4	7.6	9535
		回灌后	17.5	3050	513	92.3	0.1	0.2	4892.1	910.2	164.8	7.6	9681.4
		变化率	16.7	1.7	1.6	4.1	0.0	0.0	0.7	2.4	17.4	0.0	1.5
	开采井	回灌前	30	3775	651.3	111.8	0.6	0.1	6646.9	706	152.6	6.9	12127.5
		回灌后	32.5	3850	661.3	116.6	0.8	0.2	6735.5	725.3	170.9	6.9	12347.3
		变化率	8.3	2.0	1.5	4.3	33.3	100.0	1.3	2.7	12.0	0.0	1.8
平原	回灌井	回灌前	7	1540	108.2	30.4	0.6	0.3	1591.7	1256	238	8.2	4788.4
		回灌后	11	1635	138.6	23.7	0.6	<0.1	1666.2	1095.6	251.3	7.9	5007.9
		变化率	57.1	6.2	28.1	-22.0	0.0	-	4.7	-12.8	5.6	-3.7	4.6
	开采井	回灌前	7	1540	132.3	19.4	<0.1	<0.1	1928.5	958.2	268.5	8.2	4872.2
		回灌后	7	1640	140.3	23.1	<0.1	<0.1	1953.3	1027.8	305.1	8.2	5115.9
		变化率	0.0	6.5	6.0	19.1			1.3	7.3	13.6	0.0	5.0
德城区	回灌井	回灌前	13	1680	70.1	41.3	0.5	0.1	2144.7	631.6	262.4	8	4882.8
		回灌后	10	1650	112.2	21.9	1.2	<0.1	2144.7	754.1	274.6	8.1	4986.6
		变化率	-23.1	-1.8	60.1	-47.0	140.0		0.0	19.4	4.6	1.3	2.1
	开采井	回灌前	12	1600	88.2	42.5	1.8	0.7	2095.1	703.6	238	8.2	4816.6
		回灌后	11	1640	110.2	29.2	0.3	<0.1	2242.2	775.7	219.7	8.1	5045.2
		变化率	-8.3	2.5	24.9	-31.3	-83.3	-	7.0	10.2	-7.7	-1.2	4.7
示范工程	回灌井	回灌前	13.1	1743	101.7	20.5	<0.1		2157.6	654.6	229.1	7.9	4980.8
		回灌后	11	1600	106.2	23.1	1.6	<0.1	2144.7	653.2	231.9	8.2	4785.5
		变化率	-16.0	-8.2	4.4	12.7	-	-	-0.6	-0.2	1.2	3.8	-3.9
	开采井	回灌前	14.4	1732	102.4	20.4	0.1		2218.9	654.6	214.4	8	4988.2
		回灌后	12	1620	108.2	24.3	0.4	<0.1	2141.2	662.8	225.8	8.1	4809.8
		变化率	-16.7	-6.5	5.7	19.1	300.0	-	-3.5	1.3	5.3	1.3	-3.6

注:表中单位为 mg/L;德城区回灌试验地点位于鲁北院院内,下同。

4 回灌堵塞评价

砂岩热储孔隙直径较小,回灌流体中的悬浮物和化学沉淀容易堵塞孔隙,使回灌井的渗透性能降低,导致回灌持续时间短、回灌率偏低、灌量衰减明显,回灌工程不能正常开展工作。所以开展回灌堵塞评价,判断回灌堵塞的程度,对回灌工程正常运行是非常必要的。

4.1 评价指标与分级

根据笔者对以往开展的回灌试验数据的分析,可以用回灌井回灌前、后的单位涌水量变化率,渗透系数的比值、单位回灌量比值等指标来评价回灌堵塞程度。

4.1.1 单位涌水量变化率

回灌前的单位涌水量根据回灌井在成井时或回灌前开展的抽水试验成果资料确定,回灌后的单位涌水量根据回灌后回扬时抽水试验成果资料确定。

$$B=(q_{前}-q_{后})/q_{前}\times 100\%$$
 (2)

$$q_{前}=Q_{前}/S_{前}$$
 (3)

$$q_{后}=Q_{后}/S_{后}$$
 (4)

式中: B —回灌前、后的单位涌水量的变化率(无量纲); $q_{前}$ 、 $q_{后}$ 为回灌前、后的单位涌水量($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$); $Q_{前}$ 、 $Q_{后}$ 为回灌前、后的涌水量(m^3/h); $S_{前}$ 、 $S_{后}$ 为回灌前、后的抽水试验降深(m)。

4.1.2 渗透系数比值

当回灌后的渗透系数大于回灌前的渗透系数,

则可以认为热储层改良。但根据国内外及本单位以往工作经验,随着回灌时间的延续回灌能力是降低的,因此,当回灌后的渗透系数小于回灌前的渗透系数,可认为发生堵塞,堵塞程度用渗透系数的比值 $K_{堵}$ 进行判断。

$$K_{堵}=k_r/k_e \tag{5}$$

式中: $K_{堵}$ 为回灌前、后回灌井渗透系数的比值(无量纲); k_r 为回灌井回灌后的渗透系数(m/d); k_e 为回灌井回灌前的渗透系数(m/d)。

4.1.3 单位回灌量比值

根据回灌量、回扬量与水位的关系,可以分析、判别回灌井的堵塞情况,在回灌过程中,若回灌井水位突然上升或连续上升,回扬时的动水位突然下降或连续下降,不能稳定在某一标高,可认为回灌井堵塞。可以用单位回灌量来判断堵塞程度。

$$\epsilon=q_{末}/q_{前} \tag{6}$$

$$q_{末}=Q_{末}/\Delta h_{末} \tag{7}$$

$$q_{前}=Q_{前}/\Delta h_{前} \tag{8}$$

式中: ϵ 为单位回灌比值(无量纲); $q_{末}$ 、 $q_{前}$ 为回灌末期、前期的单位回灌量($m^3/h \cdot m$); $Q_{末}$ 、 $Q_{前}$ 为回灌

末期、前期的回灌量(m^3/h); $\Delta h_{末}$ 、 $\Delta h_{前}$ 为回灌末期、前期的水位升幅(m)。

根据回灌前后回灌井单位涌水量、渗透系数、单位回灌量变化,将回灌堵塞程度分为严重堵塞、中度堵塞和轻度堵塞三级,分级标准如表4所示。

表 4 回灌对储层堵塞程度分级表

分级指标	堵塞程度		
	严重	中等	轻度
回灌前、后单位涌水量变化率 B	$\geq 50\%$	$20\% \sim 50\%$	$\leq 20\%$
回灌前、后渗透系数比值 $K_{堵}$	≤ 0.5	$0.5 \sim 0.8$	$0.8 \sim 1$
单位回灌量比值 ϵ	≤ 0.3	$0.3 \sim 0.6$	≥ 0.6

4.2 回灌堵塞程度评价

2013 年~2017 年供暖季分别在德城区、平原县、商河县等地分别开展的科研性回灌试验,回灌试验前、后以回灌井为抽水井、开采井为观测井分别开展了非稳定流抽水试验,根据试验数据分别计算回灌前后储层的单位涌水量的变化率、渗透系数的比值(表5)和单位回灌量比值(表6)。由表5、表6可知:

表 5 回灌对储层堵塞程度评价表

Table 5 Evaluation of blockage degree of reinjection

位置/ 试验日期	试验阶段	主井(回灌井)稳定流抽水试验结果						观测孔(开采井)非稳定流抽水参数			
		降深 (m)	流量 (m^3/h)	单位涌水量 ($m^3/h \cdot m$)	B(%) / 堵 塞程度	渗透系数 (m/d)	$K_{堵}$ / 堵 塞程度	导水系数 (m^2/d)	渗透系 数(m/d)	弹性释水 系数($\times 10^{-4}$)	$K_{堵}$ / 堵 塞程度
示范工程/ 2016.11~2017.5	回灌前	14.5	76.31	5.26	14.3 / 轻度	0.833	0.86 / 轻度	948.5	7.78	2.82	0.88 / 轻度
	回灌后	16.42	74	4.51		0.719		837	6.86	2.84	
德城区/ 2014.11~2015.3	回灌前	10.68	83	7.77	36.4 / 中度	1.323	0.62 / 中度	2.22	1.37	1.64	0.97 / 轻度
	回灌后	11.74	58	4.94		0.825		2.15	1.33	1.35	
德城区/ 2015.11~2016.3	回灌前	8.65	70.53	8.15	59.0 / 严重	1.35	0.41 / 严重	2.07	1.39	1.08	0.90 / 轻度
	回灌后	14.27	47.72	3.34		0.558		1.87	1.25	1.35	

表 6 单位回灌量比值评价回灌堵塞程度表

Table 6 Ratio of unit rejection evaluation of blockage degree in reinjection

位置	前期单位回灌量 ($m^3/h \cdot m$)	末期单位回灌量 ($m^3/h \cdot m$)	单位回灌量 比值 ϵ	堵塞 程度
示范工程	0.39	0.36	0.92	轻度
德城区	2.50	1.83	0.73	轻度
平原县	11.62	5.88	0.51	中度
商河县	2.49	2.21	0.89	轻度

(1)回灌堵塞程度为轻度到严重。回灌前、后储层的单位涌水量变化率 14.3%~59.0%,渗透系数比值为 0.41~0.86(主井)、0.88~0.97(观测井),单位回灌量比值为 0.51~0.92,从而说明回灌后储层的涌水量减小,回灌末期的回灌量小于前期的回灌量,产生了轻度至严重堵塞。

(2)回灌堵塞主要发生在回灌井周围。回灌前、后,根据观测孔计算的渗透性数比值(0.88~0.97)要大于抽水主井计算的渗透性数比值(0.41~0.86),说明堵塞只发生在回灌井周围,使其渗透性能降低。

(3)回扬是解决回灌堵塞的有效措施。示范工程 2017 年~2018 年供暖季回灌前对回灌井进行回扬时发现,回扬初期地热流体较为浑浊,含砂量较大,呈褐色-黑褐色,2h 后逐渐清澈。但回扬水量明显减小,静水位 76m,降深 16.4m 时出水量 42.96 m^3/h ,单位涌水量 2.62 $m^3/h \cdot m$,远小于成井时的单位涌水量 4.71 $m^3/h \cdot m$,说明回灌井产生了堵塞,伴随着继续回扬,48h 后回扬水量增大,降深 18.2m 时,出水量达 70.06 m^3/h ,单位涌水量为

4.51 m³/h·m,基本达到了回灌前的出水能力,地热流体变得清澈透明,说明回扬使得热储含水层变得通畅。

(4)回灌水源净化可以有效预防回灌堵塞的发生机率。德城区 2015 年~2016 年供暖季回灌试验中,采集的过滤器滤芯沉淀物鉴定结果表明,沉淀物中 90%以上为褐铁矿化泥质角砾或粉砂,含少量石英砂粒和长石砂粒,粒径在 0.05×0.05~1.6×1mm 之间,而热储砂岩的粒径为 0.05~0.6mm 之间,孔隙基本属于粒间孔隙,形态不规则,约 0.001~0.05mm,说明 50μm 的过滤精度可以有效过滤大部分沉淀物,5μm 的过滤精度可以满足细小砂粒的过滤。

5 回灌对热储温度的影响评价

5.1 评价指标

地热回灌是将提取热量后的低温回灌水回灌至热储层中,回灌水温通常比原热储层流体温度低得多,因此把相对温度低得多的回灌水通过回灌井注入热储层中,势必引起热储层局部流体温度的降低甚至产生热突破,导致回灌工程失败。本次采用温度的变化率评价回灌对热储温度的影响。

$$T_{\text{变}}=(T_{\text{初}}-T_{\text{后}})/T_{\text{初}}\times 100\%$$

式中: $T_{\text{变}}$ 为温度变化率(无量纲); $T_{\text{初}}$ 为回灌前开采井井口温度(℃); $T_{\text{后}}$ 为回灌后开采井井口温度(℃)。

根据开采井热储温度变化,将回灌对热储温度的影响程度分为大、中、小三级,分级标准如表 7 所示。

表 7 回灌对热储温度影响程度分级表

Table 7 Grading table of influence degree of reinjection on reservoir temperature

温度变化率 $T_{\text{变}}$	$\geq 2\%$	$1\% \sim 2\%$	$\leq 1\%$
影响程度	大	中	小

5.2 回灌对热储温度评价

2013 年~2017 年供暖季分别在德城区、平原县、商河县等地开展的回灌试验中,均对开采井井口温度进行了动态观测(图 4),同时示范工程 2017 年~2018 年供暖季回灌结束后,自 2018 年 3 月 23 日至 10 月 20 日开展了 9 次回灌热储层段温度动态观测(图 5)。根据观测数据分析评价回灌对热储温度的影响程度(表 8)。

(1)采灌井距 180~500m 时,回灌的低温地热尾水对开采井水温影响较小。由表 7 可知,历经一

个供暖季的回灌,回灌水温为 21~34.1℃,热储温度为 53~56.7℃,开采井井口水温的变化率为 0%~0.5%,回灌对热储温度的影响较小。但应当指出该数据仅是一个供暖季的监测结果,随着回灌的逐年进行,应当持续观测开采井的井口水温,若变化率大于 1%或温度降低大于 1℃时就应调整回灌方案,如减小回灌量、增大回灌温度等,以防止产生热突破。

表 8 回灌对热储温度影响评价表

Table 8 Assessment of the effect of reinjection on reservoir temperature

位置	回灌前井口温度(℃)	回灌后井口温度(℃)	回灌温度(℃)	采灌井距(m)	温度变化率 $T_{\text{变}}(\%)$	影响程度
示范工程	53	53	32	180	0	小
平原县	57	56.7	21~32	231	0.5	小
商河县	55	54.9	34.1	500	0.2	小

注:观测周期为一个供暖季。

(2)回灌导致回灌井周边热储温度明显降低,并且恢复速率缓慢,历经一个非回灌期的温度恢复后未恢复到原热储温度。自 2018 年 3 月至 11 月历经 224 天的恢复,示范工程回灌井热储层段温度从 35.75℃逐步升高至 40.53℃(图 5、图 6),11 月 15 日后进入下一个回灌周期,远未恢复到原热储温度 55℃,温度下降 14.47℃,降幅达 26.3%,这主要是由热量补给不足造成的。热储温度恢复速率为 0.036~0.022℃/d,恢复速率由快变慢直至基本稳定。据此推测若不受人为干扰,按 0.022℃/d 的恢复速度估算,恢复到原热储温度,还需恢复 658d。回灌在回灌井周围形成一个冷水场,回灌井的水温回升直至恢复至热储温度所需时间较长。因此需要确定合理的采灌井距,以防止产生热突破。

6 回灌对热储水位的影响分析

鲁西北坳陷区地热资源主要用于冬季供暖,水位动态变化主要受人工开采动态的影响,在冬季采暖期水位下降,非采暖期水位又略有回升,但水位整体呈下降趋势。

示范工程开采井成井于 1997 年,根据 1998~2019 年水位监测资料,水位动态变化大致可分为三个阶段(图 7):

(1)1998~2005 年小规模开采-水位缓慢下降阶段。该阶段地热资源尚未大规模开采,水位标高由 25.17m 降至 24.61m,年变幅 -0.61~0.54m,地热流体仍处于自流状态,多年平均下降速率为

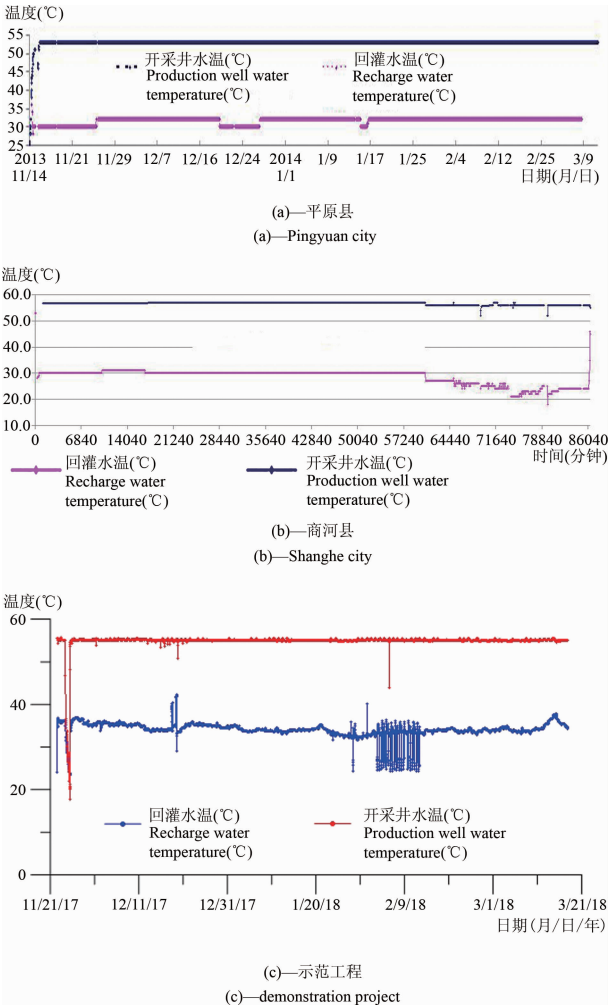


图 4 地热供暖尾水回灌温度动态曲线
Fig. 4 Temperature dynamic curve of reinjection test

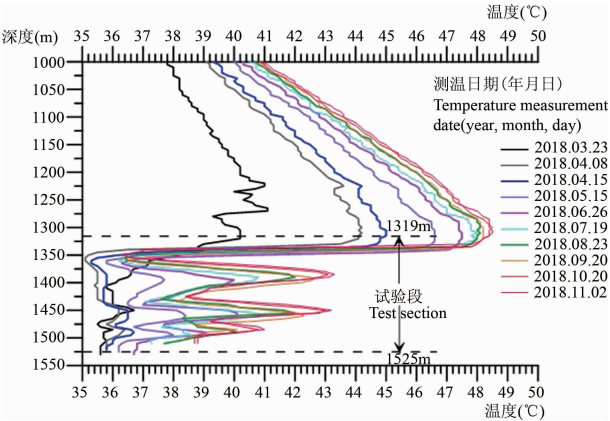


图 5 示范工程热储层段测温曲线图(2018 年)
Fig. 5 Reservoir temperature measurement curve in demonstration project(2018)

0.08m/a。

(2)2006~2016 年大规模开采-水位快速下降阶段。该阶段地热资源开采量大幅增加,水位标高

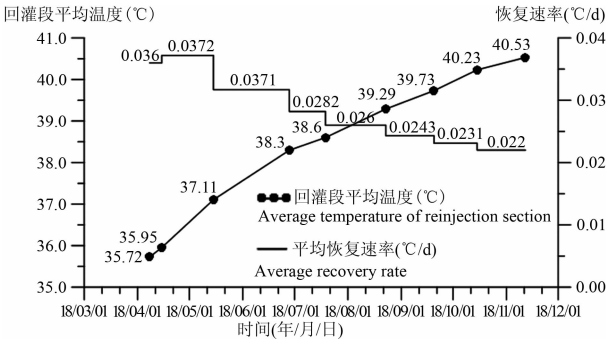


图 6 示范工程热储层段温度恢复速度曲线图(2018 年)
Fig. 6 Reservoir temperature recovery velocity curve in demonstration project(2018)

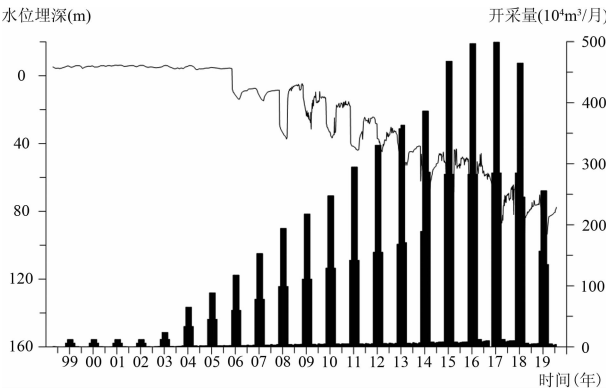


图 7 示范工程水位动态曲线图
Fig. 7 Water level dynamic curve in demonstration project

由 24.61m 降至 -39.44m,年变幅 -11.97 ~ -3.66m,地热流体不再自流,水位多年平均下降速率 5.82m/a,与 1998~2005 年多年平均下降速率比较,水位下降速率差平均为 0.52 m/a。

(3)2017~2019 年回灌开采-水位下降减缓阶段。该阶段地热资源开采量较大,水位仍呈下降趋势,水位标高由 -39.44m 降至 -59.11m,多年平均下降速率为 6.56m/a,年变幅 -9.2 ~ -3.34m,与 2005~2016 年多年平均下降速率比较,水位下降速率差平均为 0.25 m/a。

示范工程自 2016~2017 年供暖季开展回灌工作以来,已连续稳定回灌三个供暖季,年回灌量 $15.14 \times 10^4 \sim 19.49 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,累计回灌量 $51.39 \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了供暖尾水的全部回灌,虽然相对整个德城区的开采量来说,回灌量还比较少,但也取得了比较显著的环境效益,从上述水位动态变化可以看出,开展回灌工作以来,水位年变幅回灌前的 -11.97~-3.66m 减少至 -9.2~-3.34m,呈减小趋势,水位下降速率差由 0.52m/a 降低至 0.25m/a,减缓了 50%。由此说明地热回灌可补给

地热资源,延缓热储水位下降速度。

7 结论

(1)回灌未改变热储流体的水化学类型,主要元素 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的变化率较小,成垢离子 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 变化率较大。测试结果表明,地热供暖尾水与热储流体相比,只是降低了温度,水化学类型仍是 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型,是良好的回灌水源,主要元素 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的变化率分别为 $1.7\% \sim 8.2\%$ 、 $0.6\% \sim 7.0\%$ 、 $0.2\% \sim 19.4\%$,成垢离子 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 变化率分别为 $33.3\% \sim 140\%$ 、 $28.1\% \sim 60.1\%$,这也是导致回灌堵塞的主要原因之一。

(2)回灌堵塞主要发生在回灌井周围,回灌堵塞程度为轻度到严重。相比回灌前,回灌后回灌井的单位涌水量降低 $14.3\% \sim 59.0\%$ 、渗透系数为原来的 $41\% \sim 86\%$,末期单位回灌量为初期回灌量的 $51\% \sim 92\%$ 。回扬是解决回灌物理堵塞的有效措施。回扬初期地热流体较为浑浊,含砂量较大,呈褐色-黑褐色,2h 后逐渐清澈,48h 后基本达到了回灌前的出水能力,地热流体也变得清澈透明,说明回扬使得热储含水层变得通畅。

(3)回灌导致回灌井周边热储温度明显降低,历经一个非回灌期远未恢复到原热储温度。采灌井距 $180 \sim 500\text{m}$,回灌水温 $21 \sim 34.1^\circ\text{C}$,历经一个供暖季的回灌,开采井井口水温的变化率为 $0\% \sim 0.5\%$,影响较小。历经一个非回灌期 224d,热储温度从 35.7°C 恢复到 40.53°C ,恢复速率为 $0.036 \sim 0.022^\circ\text{C}/\text{d}$,按 $0.022^\circ\text{C}/\text{d}$ 的恢复速度估算,还需 658d 才能恢复到原热储温度(55°C),这也说明本区不能采用采灌井交替使用、互为采灌的开发利用方案。

(4)回灌可延缓热储水位下降速度,应加强回灌数值模拟与长期动态观测,预测大规模采灌条件下热储温度、水位的恢复情况,设置合理的采灌井距,确定适宜的回灌温度和回灌量,根据观测数据进行回灌对储层的影响评价调整开采、回灌方案。防止发生热突破,保障回灌工程的长期可持续运行。

References

Dai Qun, Wang Cong, Luo Yang, Xu Binbin, Yin Wenting, Wang Pengfei. 2017. Research on sandstone geothermal reservoir reinjection plugging mechanism and measures against it. *Advances in Fine Petrochemicals*. 18(6):10~13(in Chinese with English abstract).

He Manchao, Li Chunhua, Zhu Jialing. 2004. Medium and low enthalpy geothermal engineering technology in China. Beijing:

Science Press, 241~242(in Chinese with English abstract).

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 (in Chinese with English abstract).

Kang Fengxin. 2018. Assessment of Geothermal Resources in Shandong Province. Beijing: Science Press. (in Chinese with English abstract).

Liang Jing, Guo Quancheng. 2016. On Xinxiang Geothermal Reinjection Test and Feasibility Analysis. *Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute*, 28(3): 38~41 (in Chinese with English abstract).

Lin Jianwang, Liu Xiaoman, Gao Baozhu, Wang Xinyi. 2006. Analyses and Discussion on Geothermal Reinjection Test in Tianjin. *Journal of Henan Polytechnic University*, 25(3): 200~204 (in Chinese with English abstract).

Liu Guiyi. 2001. Basic characteristics and water environment problems of deep groundwater in northern Shandong plain. *Shandong Geological*, 17(5): 43~47 (in Chinese with English abstract).

Liu Xueling, Zhu Jialing. 2009. A study of clogging in geothermal reinjection wells in the Neogene sandstone aquifer. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009(5): 138~141 (in Chinese with English abstract).

Liu Jiurong. 2003. The status of geothermal reinjection. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 30(3): 100~104 (in Chinese with English abstract).

Megel T, Rybach L. 2000. Production capacity and sustainability of geothermal doublets. *Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*, 849~854.

Pritchett J W. 1993. Modeling post-abandonment electrical capacity recovery for a two-phase geothermal reservoir. *Geothermal Resources Council Transactions*, 22: 267~280.

Rybach L. 2003. Geothermal energy: Sustainability and the environment. *Geothermics*, 32: 463~470.

Ruan Chuanxia, Feng Shuyou, Shen Jian, Lin Li, Jiang Guosheng. 2017. A Study on the recycling utilization of geothermal resources in Binhai New Area, Tianjin-Study and demonstration of thermal storage and reinjection technology of Guantao reservoir. *Journal of Geomechanics*, 23(3): 498~506 (in Chinese with English abstract).

Tan Zhirong. 2010. Analysis on Recharge Property of Guantao Geothermal Reservoir in Dongying City. *Land and Resources in Shandong Province*. 26(8): 13~17 (in Chinese with English abstract).

Wang Yanjun, Liu Guiyi, Hu Songtao. 2008. Study on geothermal resources zoning in northern Shandong. *Geological Survey and Research*, 31(3): 270~277 (in Chinese with English abstract).

Wright P M. 1995. The sustainability of production from geothermal resources. *Proceedings, World Geothermal Congress, Florence, Italy*, 18~31 May.

Xu Junxiang, Kang Fengxin. 2014. Shandong Geothermal Resources. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

Yan Wenzhong, Mu Genxu, Liu Jianqiang. 2014. Experimental study of geothermal tail-water reinjection in the Guanzhong urban area of the Weihe basin, Shanxi province. *Shanghai Land & Resources*, 35(2): 32~35 (in Chinese with English abstract).

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 (in Chinese with English abstract).

Zeng Meixiang, Tian Guanghui, Zhao Yuebo, Zhu Jingyuan. 2010. A tentative discussion on dynamic characteristics of the low-medium temperature geothermal reservoir field under the

- condition of exploitation reinjection. *Geology in China*, 37(1): 191~197. (in Chinese with English abstract).
- Zhang Pingping, Zhang Dongsheng, Liu Shengli, Yang Yabin, Wang Lidong. 2015. Feasibility Study on geothermal tail water reinjection in Guantao Formation Shandong Province. *Land and Resources in Shangdong Province*. 31(8): 50~53 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xinwen, Hu Caiping, Hu Songtao, Zhang Xuebin. 2009. Feasibility analysis on geothermal recharge of geothermal field in central district of Dongying City. *Land and Resources in Shangdong Province* 25(8): 17~20 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jichu. 2013. Lubei geothermal tail water reinjection experiments in sandstone reservoir. *Land and Resources in Shangdong Province*. 29(9): 24~31 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Shihai, Yang Xunchang, Liang Wei, Chuai Yunxiang, Li Zhiheng. 2007. Study on geothermal reinjection experiment in districts in Dezhou City. *Land and Resources in Shangdong Province*. 23(9): 11~14 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 戴群, 王聪, 罗杨, 徐彬彬, 殷文亭, 王鹏飞. 2017. 砂岩地热储层回灌堵塞机理研究及治理对策. *精细石油化工进展*, 18(6): 10~13.
- 何满潮, 李春华, 朱家玲, 等. 2004. 中国中低焓地热工程技术. 北京: 科学出版社: 241~242.
- 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.
- 康凤新等主编. 2018. 山东省地热清洁能源综合评价. 北京: 科学出版社.
- 梁静, 郭全成. 2016. 河南新乡地热回灌试验及可行性分析. *黄河水利职业技术学院学报*, 28(3): 38~41.
- 林建旺, 刘小满, 高宝珠, 王心义. 2006. 天津地热回灌试验分析及存在问题. *河南理工大学学报*, 25(3): 200~204.
- 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*, 2009(5): 138~141.
- 刘久荣. 地热回灌的发展现状. 2003. *水文地质工程地质*, 30(3): 100~104.
- 阮传侠, 冯树友, 沈健, 林黎, 江国胜. 2017. 天津滨海新区地热资源循环利用研究-馆陶组热储回灌技术研究. *地质力学学报*, 23(3): 498~506.
- 谭志容. 2010. 东营市城区馆陶组热储回灌性能分析. *山东国土资源*, 26(8): 13~17.
- 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.
- 徐军祥, 康凤新. 2014. 山东省地热资源. 北京: 地质出版社.
- 闫文中, 穆根胥, 刘建强. 2014. 陕西渭河盆地关中城市群地热水回灌试验研究. *上海国土资源*, 35(2): 32~35.
- 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.
- 曾梅香, 田光辉, 赵越波, 朱婧嫒. 2010. 采灌条件下中低温热储温度场动态特征初探. *中国地质*, 37(1): 191~197.
- 张平平, 张东生, 刘胜利, 杨亚宾, 王立东. 2015. 商河县馆陶组热储地热水回灌可行性研究. *山东省国土资源*, 31(8): 50~53.
- 张新文, 胡彩萍, 胡松涛, 张学斌. 2009. 东营市中心城区地热田地热回灌可行性分析. *山东国土资源*, 25(8): 17~20.
- 赵季初. 2013. 鲁北砂岩热储地热水回灌试验研究. *山东国土资源*, 29(9): 24~31.
- 周世海, 杨询昌, 梁伟, 啜云香, 李志恒. 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.

Impact assessment of reinjection on sandstone geothermal reservoir:
a case study of Northwest Shandong depression

FENG Shoutao^{1,2)}, WANG Chengming^{* 1,2)}, YANG Yabin^{1,2)}, SONG Weihua^{1,2)},
LIU Shuai^{1,2)}, ZHAO Jichu^{1,2)}

1) *The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shaondong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Lubei Geo-engineering Exploration Instituts), Shandong, Dezhou, 253072;*

2) *Shandong Provincial Research Center of Geothermal Resources and Reinjection, Shandong, Dezhou, 253072*

** Corresponding author; 252913428 @qq.com*

Abstract

The temporature of the geothermal tail water cools down after heat exchange. Tail water, even after treatment of filtering and degas treatment, still contains some suspending particles and gases. Hence reinjection would inevitably cause some negative impacts on the geothermal reservoir, such as reservior blockage induced decrease of reinjection rate, reservoir temperature drawdown lead to inmature thermal breakthrough. This will largely affect the sustainability of reinjection practices at sandstone geothermal reservoir. Evaluating the influence of reinjection in sandstone geothermal reservoir is of great significance to promote large-scale reinjection practices, sustainable development and protection of geothermal resource. Based on the geothermal tailwater reinjection test of the Guantao Formation geothemal reservoir, the paper established a set of evaluation indexes, in which the change rate of geothermal water chemical contents before and after the reinjection was used to evaluate the influence of reinjection to the geothermal fluid, and the temperature change rate to evaluate the influence of reinjection to the geothermal reservoir temperature, and the change rate of specific yield, permeability change ratio, and ratio of unit recharge to evaluate the severity degree of reinjection blockage, and finally set up the influence classification standard. The evaluation results show that the reinjection did not change the chemical composition of geothermal fluid. The blockage mainly occurred around reinjection wells. The specific yield fell down by 14.3%~59.0% after reinjection, and the permeability is about 41%~86% of its initial value, and the reinjection rate at later stage is about 51%~92% of that at the early stage, suggesting that the reinjection blockage severity is classified into medium to severe. The distance between the pumping and reinjections wells ranges from 180 to 500 m and it has less influence on the thermal reserves temperature after the rejection of one heating season. The reinjection has caused an obvious temperature drawdown at the geothermal reservoir near the reinjection well case, with the temperature recovering from 35.7℃ to 40.53℃ after 224 days of shutdown at non-heating season, at the temperature recovery rate of 0.036~0.022℃/d. It needs another 658 days to recover to its original temperature (55℃). The water level of geothermal reservoir in this area is still declining, but reinjection can delay the decline rate of reservoir water level.

Key words: sandstone geothermal reservoir; reinjection; impact assessment; Northwest Shandong depression