

集中采灌条件下碳酸盐岩热储群井示踪试验

殷肖肖¹⁾, 沈健¹⁾, 赵艳婷¹⁾, 刘东林²⁾, 赵苏民¹⁾, 宗振海¹⁾

1) 天津地热勘查开发设计院, 天津, 300250;

2) 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定, 071051

内容提要: 地热回灌是实现地热资源可持续发展的有力措施, 在各国已获广泛应用, 在地热资源的保护、减少资源浪费、延长地热井寿命以及减少环境污染等方面具有重要意义。天津是我国开展地热回灌比较成熟的地区之一, 截至2019年底, 天津市基岩裂隙型热储回灌率已达79.61%。大规模集中采灌条件下热储层渗流场的变化以及是否会影响热储温度已成为热储系统研究的前沿课题。本文以天津市东丽湖地区为例, 选取1,5-萘磺酸钠作为示踪剂, 在2018~2019年供暖期集中采灌期间开展了群井示踪试验, 结果显示, 供暖期内地热井开采量(或回灌量)、水温没有明显变化, 水位除受正常采灌影响外没有明显变化, 热储系统基本处于稳定状态; 试验中示踪剂回收率极低, 开采井和回灌井之间水力联系较差, 有限的优势通道中的最大流速为448.42 m/d, 优势通道的方向主要集中于北东向, 与区内主要控热断裂沧东断裂及其次生断裂的发育方向一致; 在现状开发利用模式下, 不会造成该热储层温度的显著变化。这些认识对于指导北方古潜山碳酸盐岩热储的科学开发利用具有一定的现实意义。

关键词: 碳酸盐岩热储; 地热回灌; 示踪试验; 优势通道; 热突破

碳酸盐岩含水介质通常具有高度非均质性和各向异性, 其水动力过程的复杂性给岩溶水的开发带来很多困难(Liu Jianli et al., 2000)。华北地区巨厚的沉积盖层之下古潜山碳酸盐岩分布广泛(Zhang Jinning et al., 2019), 基岩裂隙系统发育, 是典型的传导-对流复合型水热系统(Wang Guiling et al., 2020), 其蓟县系雾迷山组岩溶裂隙热储埋深通常为1500~3000 m, 地热资源储量丰富, 是目前区内地热资源开发的重点目标储层(Liu Jie et al., 2019)。为科学开发及保护地热资源, 前人针对该储层开展过大量回灌试验研究工作。早在1982年初就在北京城区地热田东南部进行了回灌试验, 但之后回灌工作未得以继续下去, 直到20世纪地热回灌才被重视起来(Liu Jiurong, 2003)。Pan Xiaoping (2006)总结了北京地热田30余年来的回灌经验, 指出北京地热回灌率为60%左右, 回灌没有造成生产井温度的下降, 明显减缓了热储压力的下降速率, 具

有显著的经济环境效益。Li Yuanjie(2010)选择北京城区典型地热井开展了回灌示踪试验, 并取得了良好的效果。此外, 河北、山东、河南等地也开展了大量基岩热储研究工作。Pang Jumei et al. (2014)开展了河北省牛驼镇地热田群井示踪试验, 获得了试验区内采灌井之间的连通特征。Dai Minggang et al. (2019)针对雄安新区3500 m以浅的中元古界热储, 从地热资源量回收率、布井规模、单井产量、国家水热下降许可指标、开采回注井距、回注量、开采时间等开发参数进行试算和分析, 评估了雄安新区地热流体可开采量, 并推出了回注井距、回注量、开采时间简化计算公式。Ma Zhemin et al. (2018)开展了山东省菏泽城区深部岩溶热储回灌试验, 认为回灌对水温、水质影响不大, 未来回灌潜力巨大。Feng Shoutao et al. (2019)、Liu Zhitao et al. (2019)分别开展了鲁北、鲁西北地区砂岩热储回灌试验研究, 认为回灌可延缓热储水位的下降速度, 对

注: 本文为天津市规划和自然资源局(原天津市国土资源和房屋管理局)项目(编号 国土房任[2014]25号)联合资助的成果。

收稿日期: 2020-04-23; 改回日期: 2020-11-19; 网络发表日期: 2020-12-11; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 黄敏、潘静。

作者简介: 殷肖肖, 女, 1990年生。硕士, 助理工程师, 主要从事地热资源监测、保护及评价相关研究工作。E-mail: 643744812@qq.com。

通讯作者: 赵苏民, 男, 1963年生。教授级高级工程师, 主要从事地热地质方面的研究工作。E-mail: 18622662811@163.com。

引用本文: 殷肖肖, 沈健, 赵艳婷, 刘东林, 赵苏民, 宗振海. 2021. 集中采灌条件下碳酸盐岩热储群井示踪试验. 地质学报, 95(6): 1984~1994, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021041.

Yin Xiaoxiao, Shen Jian, Zhao Yanting, Liu Donglin, Zhao Sumin, Zong Zhenhai. 2021. Study on tracer test of carbonate geothermal reservoir under centralized pumping and re-injection conditions. Acta Geologica Sinica, 95(6): 1984~1994.

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,且恢复速率特别缓慢,并对热储温度恢复的热量来源进行了分析。Qi Yufeng et al. (2019)以豫北平原深部碳酸盐岩热储为对象进行了回灌试验和数值模拟,结果表明回灌没有引起生产井开采水温的下降。

天津市中低温地热资源丰富(An Qingsong et al., 2016),是我国地热开发最成熟的地区之一,其大规模开发地热资源始于 20 世纪 80 年代初期,基岩热储回灌研究工作于 1996 年开始进行了同层对井回灌、同层两采一灌、异层对井回灌、定向对井采灌等不同模式的实践探索,创建了三种回灌模式(Lin Li, 2006),多次组织实施不同方式的、有针对性的、大范围内的岩溶裂隙热储回灌开采试验,基岩热储层无压大流量回灌取得成功;在自然回灌试验的基础上,1997 年开展了示踪试验,进行基岩卤化物 KI、KBr 和放射性同位素³⁵S、¹²⁵I 示踪试验,随之采灌开发模式启动推广(Wang Kun et al., 2003; Sun Baocheng et al., 2005; Zeng Meixiang et al., 2008)。2004 年,天津市地热管理处正式推广基岩地热对井回灌开采模式,同时出台了多种措施鼓励开凿回灌井和原有单井地热利用系统技术改造,回灌工作进入了一个崭新的阶段。回灌试验研究,从最初简单地提出回灌过程中参数变化(回灌温度、灌压等)对回灌能力影响,到对回灌衰减过程及机理的深入认识,逐步形成了完善的地面回灌系统设施。回灌井钻井工程质量对回灌效果的影响也进行了深入探索(Lin Li, 2006)。进入 21 世纪,天津在回灌规划布局、回灌井成井工艺、回灌方式、回灌流体处理净化工艺、回灌系统地面工程建设、回灌运行规范性操作以及采灌前后水动力场、水化学场和温度场跟踪监测、示踪试验、数值模拟等方面进行了深入研究(Wang Wanli, 2016; Ruan Chuanxia et al., 2017; Wang Wanli et al., 2018),逐渐形成了成熟的回灌技术和理论成果,为天津市回灌系统的稳定运行奠定了坚实的基础。2019 年天津市地热资源整体回灌率达到了 63.82%,其中奥陶系、寒武系和雾迷山组等基岩裂隙型热储层回灌效果较好,整体回灌率为 79.61%。

大规模集中采灌条件下碳酸盐岩热储中渗流场如何变化?高度非均质性和各向异性的岩溶裂隙热储是否存在优势通道,从而引起过早热突破及热储温度降低?本文以天津市东丽湖雾迷山组碳酸盐岩热储集中采灌区为例,选取合适的示踪剂在供暖季

集中采灌期开展群井示踪试验,定量分析回灌井和开采井之间的水力联系、导水通道以及通道内流体的流速等问题,对长期采灌可能引起的储层冷却进行预测,为优化古潜山碳酸盐岩热储系统的开发方案提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山岭子地热田的东丽湖地区西区,地质构造上属于Ⅲ级构造单元沧县隆起之Ⅳ级构造单元潘庄凸起的东缘。潘庄凸起在平面上呈 NE 向展布的狭长断块,在研究区内,潘庄凸起基岩顶板埋深总体呈西南浅、东北深的分布形态,揭露的基岩有中生界、古生界和中新元古界。沧东断裂从研究区东部穿过(图 1),断裂总体走向为 NNE,倾向 SEE,倾角为 30°~48°,为西盘上升的正断层,其空间构造形态上陡下缓,产状变化较大,断面呈铲状(Wu Tao et al., 1994; Gao Zhanwu et al., 2000)。沧东断裂发育较多裂隙,有较好的垂向连通性,是强径流带和热流通道,直接影响研究区的水动力场和温度场(Liu Zan et al., 2018),具有广泛的从 NE 向 SW 的强导水能力。Zhao Sumin et al. (2007)、Wang Jige et al. (2013)研究表明,沧东断裂不具备控制天津地热热源的深部构造条件,但它是沟通该区不同热储层的重要通道,在上地壳浅部能将下部热储层高位热能以热对流形式传递到浅部,其最大效果在靠近沧东断裂的构造裂隙发育部位,并对松散盖层的热储层有一定的影响。研究区西北侧为天津断层,走向北东,倾向北北西,为沧县隆起和冀中凹陷的边界(Liao Zhijie et al., 1993)。

研究区主要热储层为蓟县系雾迷山组热储,地层岩性以深灰色粗晶白云岩、燧石条带状白云岩为主。雾迷山组热储分为四段,上部三、四段可作为一组热储层,下部一、二段作为另一组热储层。沧东断裂以西目前钻井揭露了二、三、四段,顶板埋深为 1600~2259 m,揭露厚度为 500~1792.68 m,沧东断裂东侧钻井揭露其顶板埋深为 3481 m,揭露厚度为 153 m。该热储层岩溶裂隙、空隙较发育,富水性强,是该区主要的基岩热储层之一。裂隙率为 1.85%~12.3%,渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 4.71 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,泥质含量为 1.0%~6.0%,单井出水量多为 80~120 m³/h,最大可达 204.61 m³/h,出水温度为 87~102℃,水化学类型为 Cl·HCO₃·SO₄-Na 或 Cl·SO₄·HCO₃-Na 型(Zhao Na et al., 2016),矿化度为 1600~2200 mg/L,总硬度为 106~150

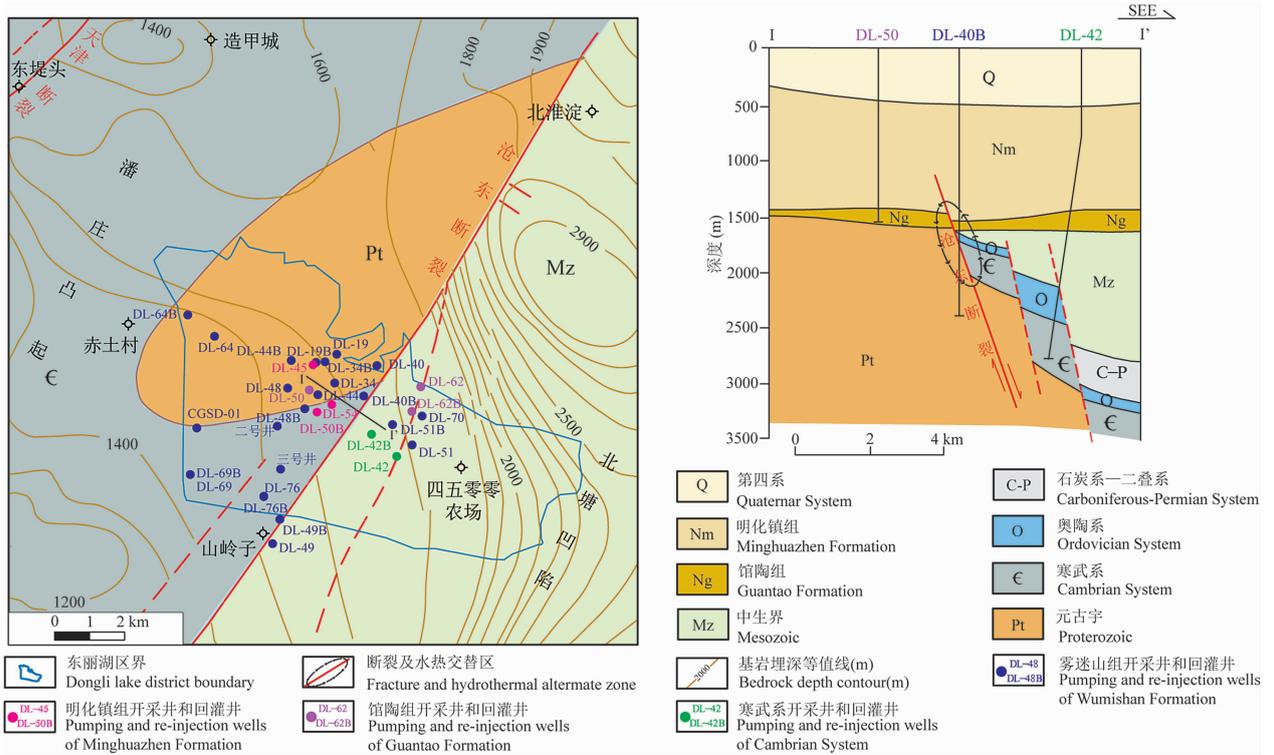


图1 天津东丽湖地区基岩地质图
Fig. 1 Geological map of bedrock in Dongli lake area, Tianjin

mg/L(以 CaCO_3 计), pH 值为 7.1~8.3。根据多年水温和水化学动态监测结果显示,该区内地热水水温和水化学特征并无明显变化。2015~2019年各年开采量、回灌量及净开采量见图2,研究区内年开采量具有逐年上升趋势,但随着回灌量的增加,净开采量从2017年开始逐渐减小,并且从2018年开始水位不再持续下降,在2019年略有抬升。

2 群井示踪试验

2.1 试验井场基本情况

本次试验共涉及地热井15眼(表1),包括明化镇组2眼(DL-45和DL-54),蓟县系雾迷山组13眼(DL-19、DL-34、DL-40、DL-44、DL-48、DL-48B、DL-49、DL-64、DL-69、DL-76、二号井、三号井和CGSD-01)。本次试验在供暖季地热井集中采灌期开展,根据试验期地热井的实际利用情况(研究区内个别不使用的地热井未纳入试验)及其分布,依据“单点投放四周监测”的原则选择投样井,同时考虑可与上次以DL-48B作为投样井开展的示踪试验作对比,决定选取DL-48B井(井号后缀B,表示该井为回灌井)作为本次示踪试验投样井,周围的开采井作为示踪试验监测井。试验投样层位和主要监测层位为蓟县系雾迷山组,辅助监测层位为明化镇组,沧东断裂

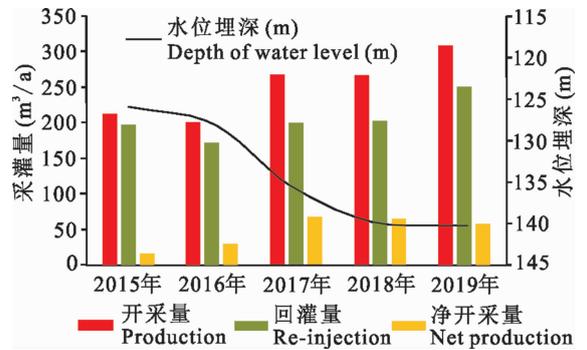


图2 2015~2019年天津东丽湖地区地热井年采灌量及水位动态
Fig. 2 Annual pumping and water levels of geothermal wells in Dongli lake area of Tianjin from 2015 to 2019

以西为试验区。根据现有钻井资料可知,试验区内蓟县系雾迷山组热储厚约1000m,热储层裂隙厚度约占取水段厚度的20%,孔隙度约为5%。

2.2 示踪剂选择

试验区曾于2015年开展过以钼酸铵作为示踪剂的蓟县系雾迷山组热储示踪试验,但在试验过程中没有捕捉到任何信号,为避免产生影响,本次试验不再选取此示踪剂。本次示踪试验前开展了吸附试验,选取1,5-萘磺酸钠作为示踪剂制作标准液与区内雾迷山组岩屑进行高温高压反应试验,并采用高效

表 1 天津东丽湖地区示踪试验地热井一览表

Table 1 Tracer test geothermal wells in Dongli lake area, Tianjin

序号	井号	水温(°C)	采灌速率(kg/s)	热储层	热储层段埋深(m)	与 DL-48B 井底的距离(m)
1	DL-19	89.5	38.77	雾迷山组	1805.48~1842.00	1850
2	DL-34	100.0	17.60	雾迷山组	1655.00~2327.10	1150
3	DL-40	98.5	45.78	雾迷山组	1794.00~2328.01	2450
4	DL-44	98.0	32.02	雾迷山组	1689.00~2252.00	575
5	DL-45	78.0	5.25	明化镇组	1254.93~1425.20	1200
6	DL-48	93.0	29.47	雾迷山组	1857.89~2231.86	750
7	DL-49	96.0	17.54	雾迷山组	2190.00~2546.00	3980
8	DL-54	80.0	14.05	明化镇组	1236.16~1439.70	780
9	DL-64	90.0	26.90	雾迷山组	1708.00~2494.00	3300
10	DL-69	94.0	25.00	雾迷山组	1895.00~2451.00	3800
11	DL-76	91.0	23.53	雾迷山组	1678.00~2397.00	2800
12	二号井	87.0	27.78	雾迷山组	1723.89~2258.96	940
13	三号井	94.5	32.04	雾迷山组	1705.97~2263.63	1875
14	CGSD-01	100.0	36.11	雾迷山组	2259.00~4051.68	3100
15	DL-48B	32.0	28.63	雾迷山组	1852.00~2533.68	—

液相色谱系统进行检测,结果显示 1 t 岩屑对 1,5-萘磺酸钠的吸附量是 0.664×10^{-5} g, 吸附率很低, 同时在实验室也模拟了高温高压条件下 1,5-萘磺酸钠水解情况, 结果显示未发生水解, 该示踪剂稳定性较好。Bernard et al. (2004)、Rose et al. (2012) 和 Kristjánsson et al. (2016) 曾利用萘磺酸盐作为示踪剂进行过示踪试验, 试验效果良好。基于上述试验结果和成功案例, 且试验区内热储系统中不存在 1,5-萘磺酸钠本底值, 故本次试验确定选其作为示踪剂。

2.3 示踪剂投放量

根据吸附试验结果和仪器检测精度, 热储层中示踪剂的浓度至少为 1.0×10^{-9} mol/L 时才可以检测到示踪剂的回收, 此时以弥散距离为 2000 m 计算所需示踪剂为 50 kg。为尽量保证示踪试验的成功, 本次投放量为计算量的 20 倍, 即投放 1000 kg 1,5-萘磺酸钠。

2.4 示踪剂投放和取样

示踪剂的投放选用天津地热勘查开发设计院研发的示踪剂投放装置, 该装置可使大量示踪剂在较短时间内迅速投入井内并于水充分混合溶解后注入井筒, 可尽量保证示踪剂起始浓度最大, 且远大于仪器检测下限。综合考虑试验区地质构造条件、地下热储水动力场特征、地热井目的热储层、井间距离、地热井利用情况等因素将采样频率分为三级。在抽水期间, I 级采样井采样频率为 3 次/天, II 级采样井采样频率为 1 次/天, III 级采样井采样频率为 1 次/周, 每级对应的采样井见表 2, 其中受地热井实际利用条件的限制, 仅将二号井、三号井和 CGSD-01

表 2 天津东丽湖地区热储示踪试验采样井分级表

Table 2 Classification of sampling well in Dongli lake area, Tianjin

采样频率级别	热储层	井号
I 级	雾迷山组(Jxtw)	DL-44、DL-48、DL-69、DL-76
II 级	雾迷山组(Jxtw)	DL-19、DL-34、DL-40、DL-49、DL-64
III 级	明化镇组(Nm)	DL-45、DL-54

降压试验期间纳入本次试验, 由于取样时间历时较短不再分级。

本次示踪试验开始于 2018 年 1 月 1 日, 至 2019 年 1 月 22 日结束, 期间因受供暖期地热井实际利用情况的影响, 造成取样不连续, 期间有 110 天取得水样, 其中主要取样时间段为 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 3 月 26 日(共计 85 天), 2018 年 3 月 27 日至 2018 年 10 月 31 日非供暖期大部分地热井处于停采状态, 期间仅对有开采的三号井进行示踪剂监测, 2018 年 11 月 1 日至 2019 年 1 月 22 日为试验开始后的第二个供暖期。

2.5 示踪剂样品检测

试验期间采集水样 1274 件, 为保证数据的准确性对其中多个水样进行多次重复检测, 共检测了 3000 个。本次检测由自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心实验室完成, 采用的仪器是上海通微 EasySep-1020 液相色谱系统, 该系统具有灵敏性高、不易受污染、试验成本低、操作简单等优点, 1,5-萘磺酸钠的检测下限为 1.0×10^{-9} mol/L。

3 试验结果及讨论

考虑数据的连续性和有效性, 本文重点对 2018

年1月1日至2018年3月26日的试验结果进行分析。动态监测数据显示,供暖期内地热井开采量(或回灌量)、水温没有明显变化,水位除受正常采灌影响外没有明显变化,供暖前后雾迷山组热储动力场特征如图3所示(图a为供暖前,图b为供暖后),整体水位埋深中南部低,断裂以东水位逐渐加深。一个供暖期结束后水位埋深趋势没有较明显变化,整体水位平均下降14~18 m,试验过程中热储系统基本处于稳定状态。

3.1 试验数据解释方法

3.1.1 示踪剂回收原理

基于裂隙介质溶质运移模型,假设对井开采利用模式下,对井中存在一维流,即向回灌井中注入示踪剂,示踪剂沿一维通道流入开采井,水流运移模型见图4和图5。在忽略分子扩散的前提下,根据质量守恒,可以得出开采井示踪剂浓度为(Axelsson et al., 2005):

$$C(t) = \frac{\rho M \mu}{2Q \sqrt{\pi D t}} e^{-(x-\mu t)^2/4Dt}$$

式中: $C(t)$ 是裂隙出口回灌水示踪剂浓度(kg/m^3); ρ 是回灌水的密度(kg/m^3); M 是流入裂隙通道的示踪剂量(kg); μ 是回灌水在裂隙中的运动速度(m/s); Q 是开采量(kg/s); D 是弥散系数(m^2/s); t 是时间(s); x 是回灌井和开采井之间裂隙通道的长度(m)。

如果有 n 条连接两眼井的通道,则开采井的示

踪剂浓度为:

$$c(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t)$$

其中:

$$c_i(t) = \frac{\rho M_i \mu_i}{2Q \sqrt{\pi D_i t}} e^{-(x_i - \mu_i t)^2 / 4 D_i t}, u_i = \frac{q_i}{\rho A_i \varphi_i},$$

$$D_i = \alpha_L \mu_i, q_i = \frac{M_i}{M} q_m$$

式中: $c(t)$ 是开采井中示踪剂的浓度(kg/m^3); $c_i(t)$ 是开采井中流经通道 i 中的示踪剂的浓度(kg/m^3); M_i 是流经通道 i 中的示踪剂量(kg); M 是示踪剂投放总量(kg); q_m 是回灌井在示踪试验期间的回灌量(kg/s); q_i 是单位时间内回灌水流向裂隙通道 i 的回灌量(kg/s); u_i 是回灌水在裂隙通道 i 的运动速度(m/s); Q 是开采井在示踪试验期间的开采量(kg/s); D_i 是裂隙通道 i 的弥散系数(m^2/s); α_L 是裂隙的纵向弥散度(m); t 是时间(s); x_i 是裂隙通道 i 的长度(m); A_i 是裂隙通道 i 的截面积(m^2); φ_i 是裂隙通道 i 的孔隙度(无量纲)。

3.1.2 热突破原理

根据图5的渗流通道模型来计算沿渗流通道的温度变化,从而进行开采井的热突破预测。基于该模型,计算开采井的流体温度公式如下(Axelsson et al., 2005),该公式耦合了渗流通道中的热对流以及围岩的热传导:

$$T(t) = T_0 - \frac{q}{Q} (T_0 - T_i) \left[1 - \text{erf} \left\{ \frac{kch}{c_w q \sqrt{K(t-x/\beta)}} \right\} \right]$$

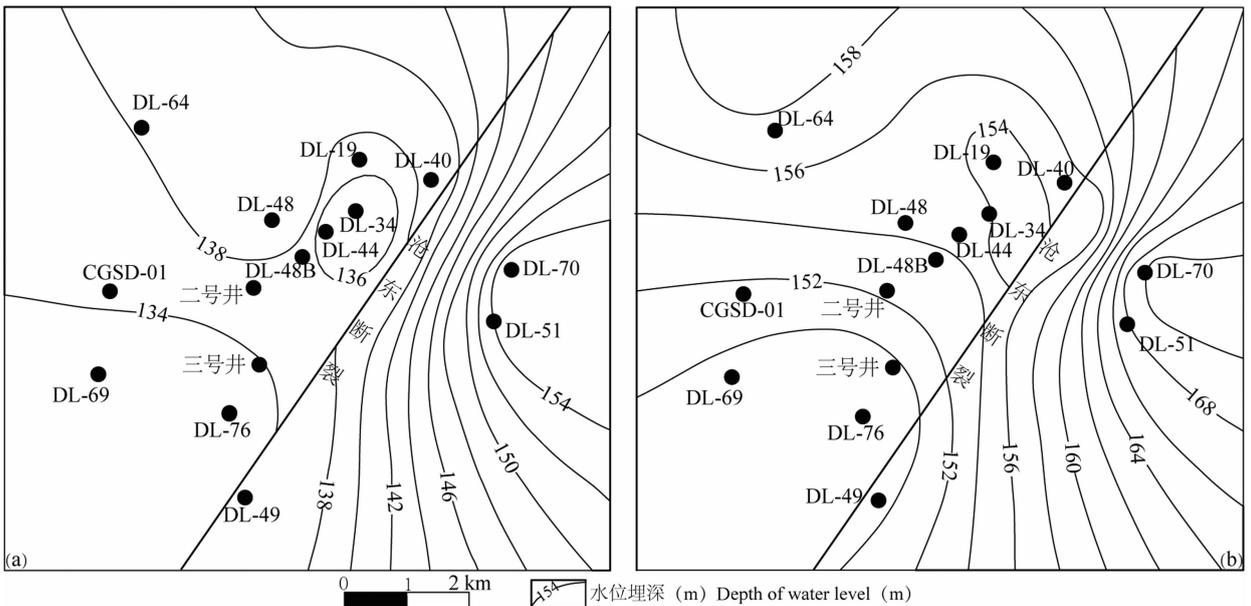


图3 天津东丽湖地区供暖前后水位埋深等值线图

Fig. 3 Contour map of water level depth before and after heating in Dongli lake area, Tianjin

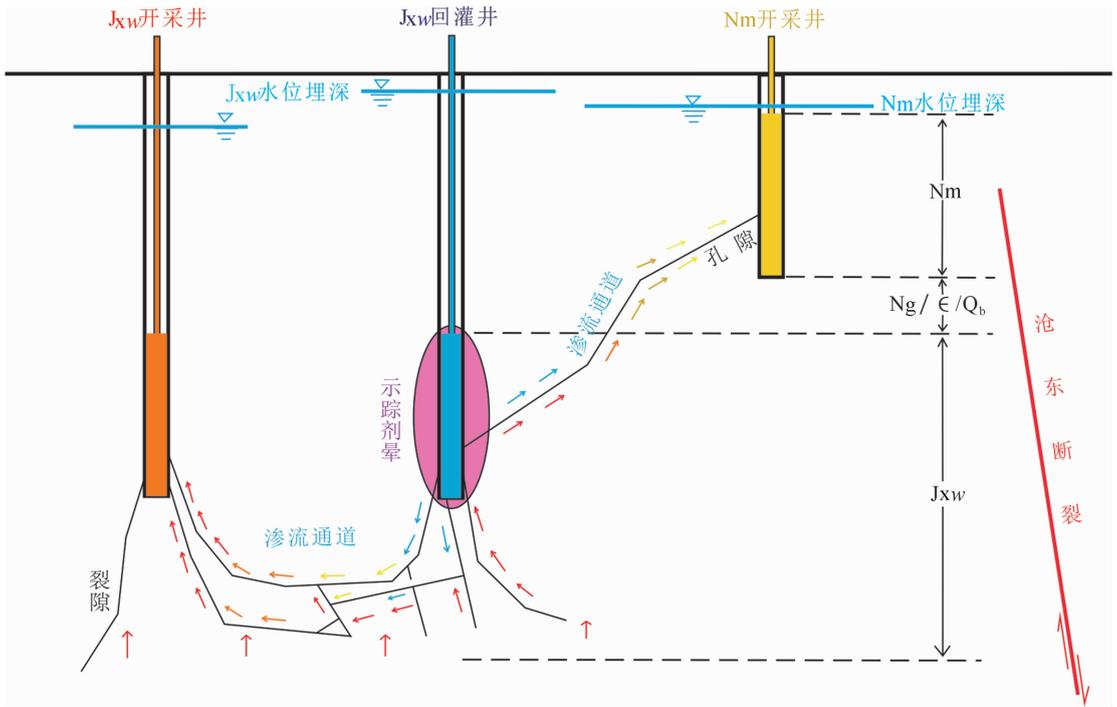


图 4 天津东丽湖地区热储回灌试验水流渗流路径图

Fig. 4 Diagram showing the flow path in tracer test in Dongli lake area, Tianjin

式中: $T(t)$ 为开采井出水温度($^{\circ}\text{C}$), T_0 为未扰动的热储温度($^{\circ}\text{C}$), T_i 为回灌水温度($^{\circ}\text{C}$), q 和 Q 分别为回灌量(kg/s)和开采量(kg/s), erf 为误差函数, k 储层岩石的导热系数($\text{w/m}\cdot^{\circ}\text{C}$), K 为热扩散率, x 为回灌井与开采井之间的距离(m), β 由以下公式给出:

$$\beta = \frac{qc_w}{(\langle \rho \rangle_f A)} \langle \rho \rangle_f = \rho_w c_w \phi + \rho_r c_r (1 - \phi)$$

式中: ρ 为密度(kg/m^3), c 为比热容($\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$), ϕ 为孔隙度, 下标 w 和 r 代表“水”和“岩石”。

基于以上理论, 本文利用 ICEBOX 程序对示踪试验数据进行回收率计算和冷却预测, 其中主要参数除表 1 中数据以外还包括岩石密度 2677 kg/m^3 、热水密度 958 kg/m^3 、岩石比热容 $838 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、热水比热容 $4212 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$, 其他参数为程序默认数值。

3.2 回收率

在送检的 14 眼采样井样品中, 有 6 眼井(DL-34、DL-44、DL-45、DL-49、DL-69 和 CGSD-01 井)示踪剂回收浓度均低于检测下限, 检测结果计为 0, 其余 8 眼井(DL-19、DL-40、DL-48、DL-54、DL-64、DL-76、二号井和三号井)均回收到了示踪剂。其中 DL-54 井为明化镇组热储, 9 组样品中仅 2018 年 3 月 14 日 1 组样品中检测到示踪剂, 示踪剂的浓度仅为

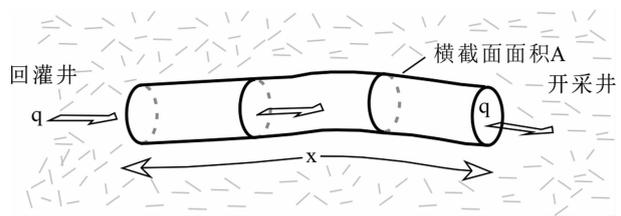


图 5 采灌井间的水流运动示意图

Fig. 5 Pipe model showing the flow from the reinjection well to pumping well

$6.4 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。Zhao Sumin et al. (2007) 研究表明, 沧东断裂(天津段)是一条隐伏的、控制沧县隆起与黄骅拗陷地质建造的重要、大型拆离断裂, 断深在上地壳底部、中地壳上部, 倾向在水平方向上延伸数 10 km, 其断裂北端越过宁河, 与蓟运河断裂相接。整体上断裂带及两盘岩体具有广泛的从 NE 向 SW 较强的导水能力, 能将下部热储层高位热能以热对流形式传递到浅部。这与本次试验结果相一致, DL-48B 井在回灌期间水位埋深在 50~60 m 之间, 水头远高于 DL-54 井的水位埋深约 100~105 m, 因此在沧东断裂的导水作用下, 部分回灌水进入了明化镇组热储。

根据采样的频率和水样检测结果, 6 眼有示踪剂回收的雾迷山组地热井中回收效果最好的是 DL-48 井(图 6), 二号井因受采样时间限制, 仅捕获到示

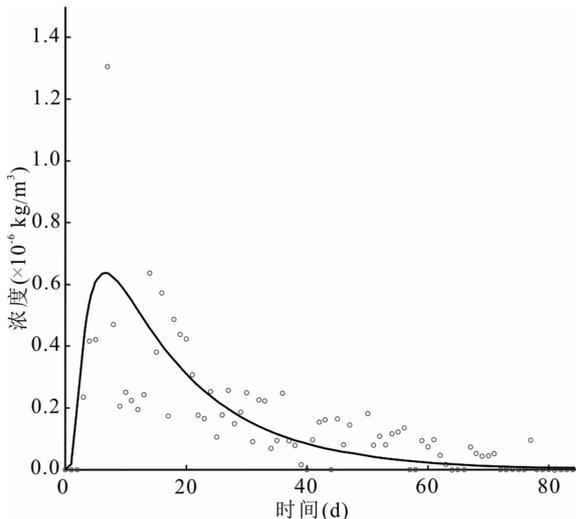


图6 天津东丽湖地区 DL-48 井示踪剂响应图
Fig. 6 Tracer test results of well DL-48 in Dongli lake area, Tianjin

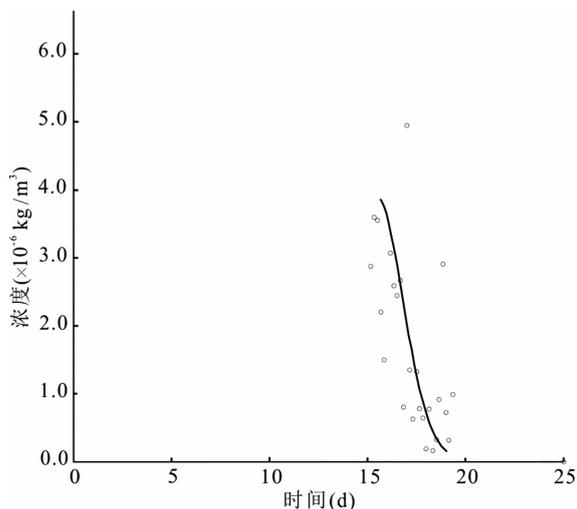


图7 天津东丽湖地区二号井示踪剂响应图
Fig. 7 Actual test results of well No. 2 in Dongli lake area, Tianjin

踪剂浓度从高到低下降的部分区间,如图7所示,其余5眼地热井均有零星检测到示踪剂回收,但浓度普遍较低。

根据 DL-19、DL-40、DL-48、DL-64、DL-76、二号井,共计6眼地热井的检测数据,运用 ICEBOX 程序对示踪剂回收及分析结果见表3。

表3 天津东丽湖地区雾迷山组热储地热井示踪试验解释成果汇总表

Table 3 Summary of tracer test interpretation results of geothermal wells in Wumishan Formation of Dongli lake area, Tianjin

	DL-19	DL-40	DL-48	DL-64	DL-76	二号井
首次到达日期(年/月/日)	2018/1/7	2018/1/4	2018/1/4	2018/2/2	2018/2/1	—
首次到达用时(d)	6	3	3	32	31	—
回收量(kg)	0.00520	0.00248	0.03230	0.00127	0.00700	≥0.03090
回收率(×10 ⁻⁵ %)	52.0	24.8	323.0	12.7	67.4	≥309.0
通道长度(m)	1850	2450	750	3300	2800	940
渗流速度(m/d)	240.41	448.42	53.48	70.85	8.64	63.52
纵向弥散度(m)	264.0	198.2	358.8	243.0	9400.0	6.4
横截面面积(×10 ⁻⁵ m ²)	9.79	1.43	156.00	4.64	135.00	126.00

3.3 渗流及优势通道

垂直发育的断裂带以及水平岩层中的裂隙都可能形成渗流的优势通道。根据以上分析结果(表3)绘制渗流速度雷达图(图8a)所示。在目前开发利用状况下试验区内通道中的最大流速为448.42 m/d,优势通道的方向主要集中于北东向。根据研究区构造地质条件可知,研究区内沧东断裂及其次生断裂较为发育,其裂隙主要沿北北东方向发育,这与示踪试验得到的优势通道的延展方向基本一致,即研究区构造地质条件和示踪试验结果得到了相互认证。DL-40井穿过该断裂,在靠近主断裂附近垂直断裂的裂隙也比较发育,极有可能存在DL-48B到主断裂的优势通道,继而直接影响DL-40,而位于两者之间的DL-34和DL-44,根据供暖期前后两期水位可

知,其水头均较DL-48B所在的区域水头高,虽然DL-48B回灌期单点水头较高,但并未在DL-34和DL-44监测到示踪剂,由此可知DL-48B与DL-34和DL-44之间水流方向主要受区域动力场影响,没有直接的裂隙通道。综上可知,研究区内碳酸盐岩热储渗流路径主要受优势通道和水头压力的控制,供暖期间雾迷山组热储地下水主要径流方向为北东向。

3.4 弥散及优势方向

开采井和回灌井之间储层弥散度差异导致主要水流方向和示踪剂回收方向不一致。根据表3绘制示踪剂回收率雷达图(图8b)。西北方向上DL-48井回收率最高,为0.00323%,西西南方向上的二号井最保守的回收率为0.00309%,试验期间示踪剂

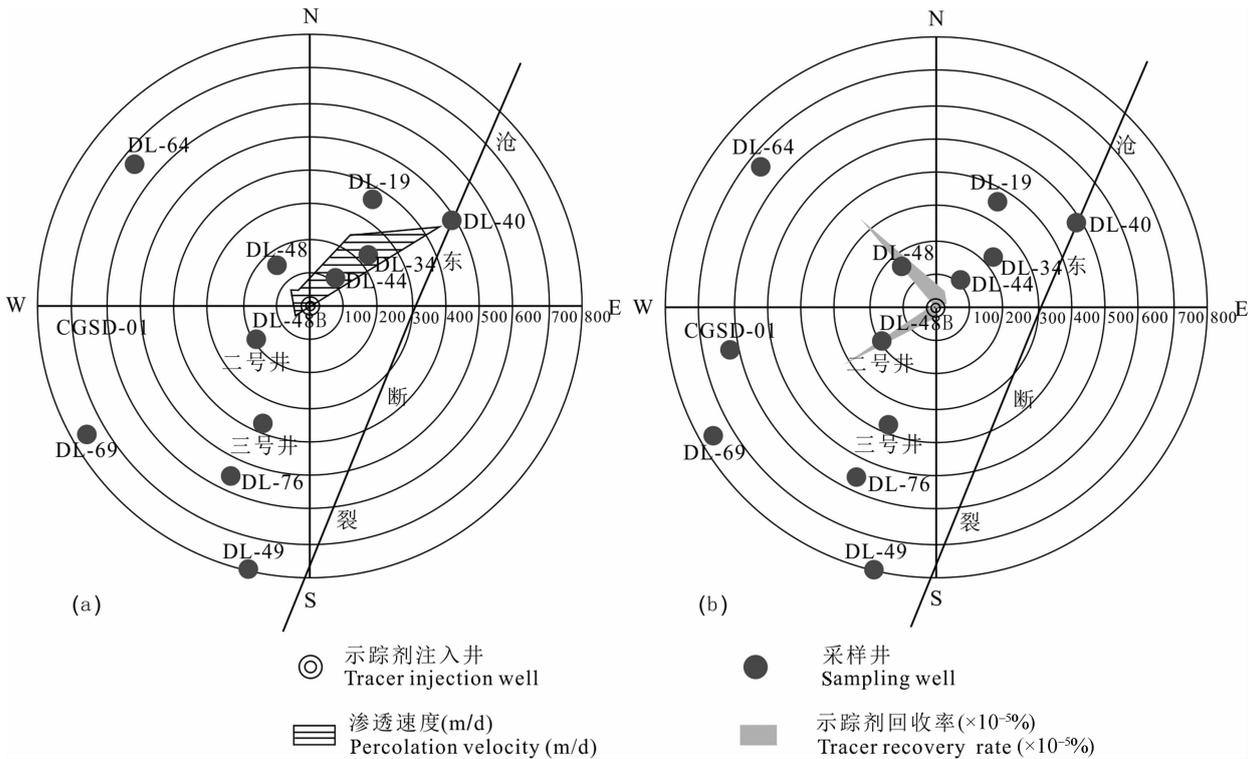


图 8 天津东丽湖地区雾迷山组热储渗流速度(a)与示踪剂回收率(b)雷达图

Fig. 8 Radar image showing the maximum flow velocity (a) and the dominant direction (b) of tracer dispersion in Wumishan Formation of Dongli lake area, Tianjin

的总回收率为 0.00789%，回收率值极低。

3.5 热突破预测

大量的回灌水注入是否引起热突破不仅取决于流道体积,还取决于流道的横截面面积和孔隙度,较大的横截面面积会导致冷却缓慢,反之亦然。根据上述优势通道和示踪剂回收情况预测 DL-48B 回灌 100 a 对影响最大的两眼井 DL-48 和 DL-40 的温度影响。DL-40、DL-48 和 DL-48B 井 2018 年开发利用状况见表 1,根据现状条件预测未来 100 a DL-40 和 DL-48 井的温度变化情况(图 9)。结果显示 84 a 后 DL-48 井热储温度仅下降 0.001℃,可忽略不计,即 DL-48 井热储流温不变,回灌没有对 DL-48 井产生冷却影响。虽然 DL-40 与 DL-48B 之间存在优势通道,但由于渗流路径长,流道的横截面面积大,现状开采 100 a 预测 DL-40 井并未发生温度变化。因此,综上判断该集中采灌系统在长期回灌条件下,在 100 a 的使用期限内,开采水温变化不明显,不会发生热突破。

2015 年 12 月本研究区也进行过一次示踪试验,同样选取 DL-48B 井为投样井,投入 700 kg 钼酸铵,在 90 d 的示踪试验中,未发现水样中有明显的示踪剂回收率,Wang Wanli et al. (2018)通过建

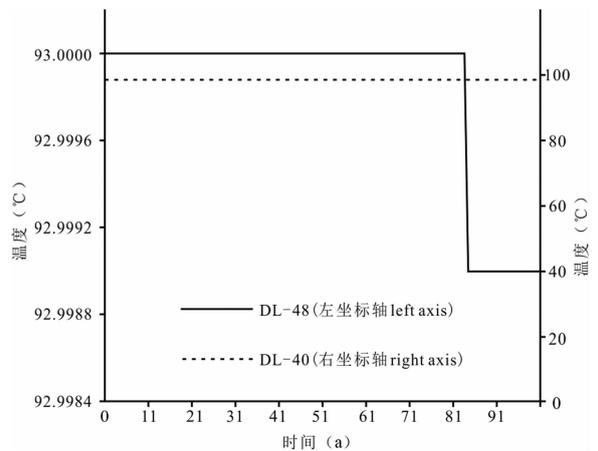


图 9 天津东丽湖地区 DL-48 和 DL-40 井 100 年热储流体温度变化预测图

Fig. 9 Prediction of temperature change of geothermal fluid of DL-48 and DL-40 wells in 100 years of Dongli lake area, Tianjin

立研究区热储数值模型模拟认为,生产井和回灌井之间没有直接联系,这与本次试验结果示踪剂回收率极低的情况近乎相同。区内目前使用最早的雾迷山组地热井已运行 20 余年,也并未出现温度降低现象,近年来区内年开采量达 300 万 m³,年回灌量达 250 万 m³,热储水位变化基本稳定甚至近年来略有

回升,由此可见研究区雾迷山组热储地热资源丰富,且开采井和回灌井之间水力联系比较好的连通通道数量极其有限,长期回灌不会引起开采井温度的降低。

4 结论

(1)区域性的深大断裂是碳酸盐岩热储系统垂向上的主要热流通道。研究区沧东断裂发育较多裂隙,有较好的垂向连通性,其沟通了上部的明化镇组热储和下部的雾迷山组热储,在垂向上能将下部热储层中的高位热能以热对流形式传递到浅部。

(2)高度非均质性和各向异性的碳酸盐岩热储中存在优势通道但数量有限,且主要受区域构造断裂控制。研究区开采井和回灌井之间主要水流方向和示踪剂回收方向不一致,示踪剂的总回收率为0.00789%,回收率值极低,多年大规模集中采灌并未监测到热储温度降低,且近年来水位略有回升,由此可见雾迷山组热储地热资源丰富,且开采井和回灌井之间水力联系比较好的连通通道数量极其有限。在目前开发利用状况下研究区内通道中的最大流速为448.42 m/d,优势通道的方向主要集中于北东向,与沧东断裂及其次生断裂发育方向一致,说明研究区内沧东断裂及其次生断裂控制了雾迷山组热储地下水主要径流方向。

(3)供暖期内地热井开采量(或回灌量)、水温没有明显变化,水位除受正常采灌影响外没有明显变化,热储系统基本处于稳定状态。预测在保持现状开采条件下,未来100 a内储层不会发生热突破。

(4)大规模集中采灌条件下碳酸盐岩热储中渗流场主要受区域性构造断裂控制,今后同类地区的地热资源的开发应重点关注区域断裂构造展布及其特征,在此基础上开展采灌井的合理布局,以避免出现资源枯竭、热突破等问题,影响地热资源的科学开发利用。

References

An Qingsong, Wang Yongzhen, Zhao Jun, Luo Chao, Wang Yan. 2016. Direct utilization status and power generation potential of low-medium temperature hydrothermal geothermal resources in Tianjin, China; a review. *Geothermics*, 64(2016):426~438.

Axelsson G, Björnsson G, Montalvo F. 2005. Quantitative interpretation of tracer test data. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, April 24~29 April 2005.

Bernard S, Peter R, Jean-Claude F, Michel B, Gilles B. 2004. Tracer testing at Soultz-Sous-Forets (France) using Na-Benzate, 1, 5 and 2, 7 Naphthalene disulfonate. *Proceedings of 29th workshop on geothermal reservoir engineering Stanford*

University, Stanford, California, January 26~28, SGP-TR-175.

Dai Minggang, Lei Haifei, Hu Jianguo, Guo Xinfeng, Ma Pengpeng, Zhang Jiayun. 2019. Evaluation of recoverable geothermal resources and development parameters of Mesoproterozoic thermal reservoir with the top surface depth of 3500m and shallow in Xiong'an New Area. *Acta Geologica Sinica*, 93(11):2874~2888(in Chinese with English abstract).

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(in Chinese with English abstract).

Gao Zhanwu, Xu Jie, Song Changqing, Sun Jianbao. 2000. Structural characteristics of the Cangdong fault in North China. *Seismology and Geology*, 22(4):395~404(in Chinese with English abstract).

Kristjánsson B R, Axelsson G, Gunnarsson G, Gunnarsson I, Oskarsson F. 2016. Comprehensive tracer testing in the Hellisheidi geothermal field in SW-Iceland. *Proceedings of 41st workshop on geothermal reservoir engineering Stanford University*, Stanford, California, February 22~24, SGP-TR-209.

Liao Zhijie, Chen Zhenxia. 1993. Thermal water of Shanlingzhi geothermal field, Tianjin. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis*, 29(2):224~232(in Chinese with English abstract).

Liu Jianli, Zhu Xueyu, Qian Xiaoxing. 2000. Study of some problems on the development and protection of fracture-karst water resources in North China. *Acta Geologica Sinica*, 74(4):344~352(in Chinese with English abstract).

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

Lin Li. 2006. Sustainable development and utilization of thermal groundwater resources in the geothermal reservoir of the Wumishan Group in Tianjin. *Poctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)* (in Chinese with English abstract).

Li Yuanjie. 2010. Study on geothermal reinjection of tracer technology and simulation of thermal energy storage. *Master thesis of Chinese Academy of Geological Sciences* (in Chinese with English abstract).

Liu Zan, Chen Haibo, Feng Shuyou, Bian Hongwei, Li Wenlong. 2018. Analysis of geothermal geology in the eastern margin of Panzhuang uplift of Cangdong fault. *Shaanxi Water Resources*, (5):101~103(in Chinese with English abstract).

Liu Jie, Song Meiyu, Qin Lihong, Yu Yan, Lin Wei, Kang Nan. 2019. Division of potential geothermal resources zones in the Wumishan formation in Tianjin. *Contribution to Geology and Mineral Resources Research*, 34(2):321~325(in Chinese with English abstract).

Liu Zhitao, Liu Shuai, Song Weihua, Yang Xunchang, Zhou Qundao. 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).

Ma Zhemin, Gong Lu, Jia Chen, Song Shuailiang. 2018. Experimental study on karst geothermal reservoir reinjection in Heze city of Shandong Province. *Land and Resources of Shandong Province*, 34(11):52~58(in Chinese with English abstract).

Pan Xiaoping. 2006. Growth of geothermal reinjection in Beijing, China. *Proceedings of the 7th Asian geothermal symposium, Qingdao*, July 25~26.

Pang Jumei, Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Luo Lu, Wang Yingchun, Wang Shufang. 2014. Interwell connectivity in a karstic geothermal reservoir through tracer tests. *Chinese Journal of Geology*, 49(3):915~923(in Chinese with English

- abstract).
- Qi Yufeng, Yang Zhen, Li Yao. 2019. Experimental study on thermal storage and recharge in deep carbonate rocks in north Henan plain. Proceedings of the 20th national annual conference on prospecting engineering (rock and soil drilling and excavation engineering), Xining, Qinghai Province, September 17~20, 169~176(in Chinese with English abstract).
- Rose P, Leecaster K, Clausen S, Sanjuan R, Ames M, Reimus P, Williams M, Vermeul V, Benoit D. 2012. A tracer test at the Soda Lake, Nevada geothermal field using absorbing tracer. Proceedings of 37th workshop on geothermal reservoir engineering Stanford University, Stanford, California, January 30- February 1, SGP-TR-194.
- Ruan Chuanxia, Shen Jian, Li Liliang, Liu Rongguang, Mou Shuangxi. 2017. Researches on the reinjection of Dongli lake bedrock reservoir in Binhai New Area, Tianjin. Geological Bulletin of China, 36(8):1439~1449(in Chinese with English abstract).
- Sun Baocheng, Zeng Meixiang, Lin Li, Zhao Sumin. 2005. Isotopic trace technique in geothermal pair recharging well system in Tianjin. Geological Survey and Research, 28(3):187~192(in Chinese with English abstract).
- Wu Tao, Li Zhiwen. 1994. An analysis of property of Cangdong fault. Acta Petrolei Sinica, 15(3):20~24(in Chinese with English abstract).
- Wang Kun, Zhu Jialing. 2003. Study on tracer test and reinjection of doublet system in Tianjin base rock reservoir. Acta Energetica Solaris Sinica, 24(2):162~166(in Chinese with English abstract).
- Wang Jige, Yi Zhidong, Jin Baozhen, Jia Zhi, Yue Liyan. 2013. Geological structure analysis on the Shanlingzi eastern part of the Cangdong fault. Geological Survey and Research, 36(3):189~193(in Chinese with English abstract).
- Wang Wanli. 2016. Modelling of tracer tests in a geothermal reservoir in Tianjin, China, Report 41 in: Geothermal training in Iceland 2016, UNU-GTP, Iceland, 891~910.
- Wang Wanli, Wang Guiling, Liu Chunlei, Čypaitė V. 2018. Modeling and prediction of tracer tests in Dongli lake area in Tianjin, China. Journal of Clean Energy Technologies, 6(3):209~212.
- 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).
- Zhao Sumin, Gao Baozhu, Li Xuemei, Li Huijuan, Hu Yan. 2007. Characteristics and water-temperature conductivity of the Cangdong fault (Tianjin Segment). Geological Survey and Research, 30(2):121~127(in Chinese with English abstract).
- Zeng Meixiang, Ruan Chuanxia, Zhao Yuebo, Tian Guanghui. 2008. Connect test between karst cranny reservoir pumping well and injection well. Geology and Prospecting, 44(2):105~109(in Chinese with English abstract).
- Zhao Na, Wang Guanghui, Jiang Guosheng, Wang Peng. 2016. Geochemical characteristics and occurrence environment of geothermal water in Dongli lake area, Tianjin, China. Contribution to Geology and Mineral Resources Research, 31(1):142~146(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinning, Fu Lixin, Zhou Jiansheng, Lou Da, Li Hongjun, Zhao Yungang, Feng Jianyuan, Wang Xin. 2019. Macroscopic distribution characteristics and evolution process of buried hill in the Huanghua depression, Bohai Bay Basin. Acta Geologica Sinica, 93(3):585~596(in Chinese with English abstract).
- 区顶面埋深在3500m以浅的中元古界热储可采地热资源量和开发参数评估. 地质学报, 93(11):2874~2888.
- 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.
- 高战武, 徐杰, 宋长青, 孙建宝. 2000. 华北沧东断裂的构造特征. 地震地质, 22(4):395~404.
- 廖志杰, 陈振霞. 1993. 天津山岭子地热田地下水. 北京大学学报(自然科学版), 29(2):224~232.
- 刘建立, 朱学愚, 钱孝星. 2000. 中国北方裂隙岩溶水开发和保护中若干问题的研究. 地质学报, 74(4):344~352.
- 刘久荣. 2003. 地热回灌的发展现状. 水文地质工程地质, (3):100~104.
- 林黎. 2006. 天津地区雾迷山组热储地下水资源可持续开发利用研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 李元杰. 2010. 地热回灌示踪技术及热储模拟实验研究. 中国地质科学院硕士学位论文.
- 刘赞, 陈海波, 冯树友, 卞洪伟, 李文龙. 2018. 沧东断裂潘庄凸起的东西缘地地质浅析. 陕西水利, (5):101~103.
- 刘杰, 宋美钰, 秦莉红, 于彦, 林激, 康楠. 2019. 天津地区雾迷山组地热资源潜力区划. 地质找矿论丛, 34(2):321~325.
- 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.
- 马哲民, 仝路, 贾琛, 宋帅良. 2018. 山东省菏泽市城区岩溶热储回灌试验. 山东国土资源, 34(11):52~58.
- 庞菊梅, 庞忠和, 孔彦龙, 罗璐, 王迎春, 王树芳. 2014. 岩溶热储井间连通性的示踪研究. 地质科学, 49(3):915~923.
- 齐玉峰, 杨珍, 李尧. 2019. 豫北平原深部碳酸盐岩热储回灌试验研究. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流会论文集, 169~176.
- 阮传侠, 沈健, 李立亮, 刘荣光, 牟双喜. 2017. 天津市滨海新区东丽湖地区基岩热储回灌研究. 地质通报, 36(8):1439~1449.
- 孙宝成, 曾梅香, 林黎, 赵苏民. 2005. 天津地热对井回灌系统中的同位素示踪技术. 地质调查与研究, 28(3):187~192.
- 吴涛, 李志文. 1994. 关于沧东断裂性质分析. 石油学报, 15(3):20~24.
- 王坤, 朱家玲. 2003. 天津基岩热储对井系统回灌与示踪剂试验研究. 太阳能学报, 24(2):162~166.
- 王继革, 易志东, 靳宝珍, 贾志, 岳丽燕, 魏永民. 2013. 沧东断裂山岭子东段地质构造分析. 地质调查与研究, 36(3):189~193.
- 王贵玲, 简文静. 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.
- 赵苏民, 高宝珠, 黎雪梅, 李会娟, 胡燕. 2007. 沧东断裂(天津段)特征及导热热性质分析. 地质调查与研究, 30(2):121~127.
- 曾梅香, 阮传侠, 赵越波, 田光辉. 2008. 岩溶裂隙热储层采、灌井井间连通试验研究——以天津市王兰庄地热田回灌井HX-25B示踪测试为例. 地质与勘探, 44(2):105~109.
- 赵娜, 王光辉, 江国胜, 王鹏. 2016. 天津东丽湖地区地热流体地球化学特征及其赋存环境. 地质找矿论丛, 31(1):142~146.
- 张津宁, 付立新, 周建生, 楼达, 李宏军, 赵勇刚, 冯建园, 王鑫. 2019. 渤海湾盆地黄骅拗陷古潜山的宏观展布特征与演化过程. 地质学报, 93(3):585~596.

参 考 文 献

戴明刚, 雷海飞, 胡甲国, 郭新锋, 马鹏鹏, 张家云. 2019. 雄安新

Study on tracer test of carbonate geothermal reservoir under centralized pumping and re-injection conditions

YIN Xiaoxiao¹⁾, SHEN Jian¹⁾, ZHAO Yanting¹⁾, LIU Donglin²⁾, ZHAO Sumin^{* 1)}, ZONG Zhenhai¹⁾

1) *Tianjin Geothermal Exploration and Development Designing Institute, Tianjin 300250, China;*

2) *Center of Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geology Survey, Baoding, Hebei 071051, China*

** Corresponding author: 18622662811@163.com*

Abstract

Geothermal re-injection is a powerful measure to realize the sustainable development of geothermal resources, which have been widely used in various countries of the world. It is of great significance for the protection of geothermal resources, the reduction of resource waste, the extension of pumping well life and the reduction of environmental pollution. Tianjin is one of the earliest regions to carry out geothermal re-injection in China. By the end of 2019, the recharge rate of fractured reservoir of bedrock in Tianjin had reached 79.61%. The change of seepage field of geothermal reservoir under large-scale concentrated pumping and re-injection, and whether it will cause the decrease of geothermal reservoir temperature have become the front research topic of thermal reservoir system. Taking Dongli lake area of Tianjin as an example, this paper selects 1, 5-naphthalene sulfonate sodium as tracer, and carries out the tracer test of well group during the central pumping and re-injection in the heating season from 2018 to 2019. The results show that there are no obvious changes in geothermal well pumping (or re-injection) and water temperature during the heating period, and the water level shows no obvious changes except under the influence of normal pumping and re-injection. The tracer recovery rate is very low in the test, which shows that the hydraulic connection between the pumping wells and the re-injection wells is poor, and the maximum flow velocity in the limited dominant channel is 448.42 m/d. The direction of the dominant channel is mainly concentrated in the north-east direction, and is consistent with the direction of Cangdong fault and its secondary fault, which is the main thermal-controlling fault in the area. Under the present exploitation and utilization mode, the temperature of the thermal reservoir will not change significantly. These conclusions are of practical significance for guiding the scientific development and utilization of carbonate reservoirs in the buried hills of north China.

Key words: carbonate reservoir; geothermal re-injection; tracer test; dominant channel; thermal breakthrough