

引用格式:薛宇泽,张玉贵,麻银娟,等.鄂尔多斯盆地东南缘岩溶热储对井回灌示踪试验[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):757-764.

XUE Yuze, ZHANG Yugui, MA Yinjuan, et al. Reinjection tracer test of karst geothermal reservoir in the southeastern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 757-764.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.006

鄂尔多斯盆地东南缘岩溶热储对井回灌示踪试验

薛宇泽^{1,2}, 张玉贵³, 麻银娟³, 薛超³

(1. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021;

2. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安 710021; 3. 陕西省一三一煤田地质有限公司, 陕西 韩城 715400)

摘要:回灌对维持地热储层压力、延长地热田寿命、保护生态环境具有重要的作用。鄂尔多斯盆地东南缘韩城地区广泛发育岩溶裂隙型地热资源,但其开发利用规模较小,为进一步评价该地区岩溶热储开发潜力,依托某地热工程,选取硫氰酸铵作为示踪剂开展对井回灌示踪试验,采用热突破模型预测长期回灌可能引起的开采井温度变化。结果表明,采灌井之间水力联系密切,有1个主通道与之直接相联,也可能存在其他次级通道。主通道上可能有溶潭发育,开采井温度100 a内下降了8.31 °C,该对井回灌系统在服务期内未引起热储温度剧烈下降。

关键词:鄂尔多斯盆地;岩溶热储;对井回灌;示踪试验;开采井温度

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Reinjection tracer test of karst geothermal reservoir in the southeastern margin of Ordos Basin

XUE Yuze^{1,2}, ZHANG Yugui³, MA Yinjuan³, XUE Chao³

(1. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 2. Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. Shaanxi 131 Coal Geology Co., Ltd., Hancheng, Shaanxi 715400, China)

Abstract: Reinjection plays a crucial role in maintaining the pressure of geothermal reservoirs, extending the lifespan of geothermal fields and preserving the environment. In the Hancheng area, located at the southeastern margin of the Ordos Basin in Shaanxi province, there is an abundance of karst geothermal resources. Despite this, the level of development and utilization of these resources in the region remains relatively limited. To further evaluate the development potential of Karst geothermal resources in the region, we implemented a karst geothermal heating project and conducting a tracer test, employing NH₄SCN as the tracer. The goal was to establish an hydraulic connection between the production well and the reinjection well. Utilizing the thermal breakthrough model, predictions were made regarding the changes in the temperature of the production well as a consequence of long-term reinjection. The findings suggest that there is a primary direct pathway for the flow of water, and possibly a secondary path that may contribute to groundwater storage. The temperature of production well's water is projected to decline by 8.31 °C over 100 years due to the reinjection process. However, this decline is not expected to cause a severe temperature drop in the geothermal reservoir within this dual-well system.

Keywords: Ordos basin; karst geothermal; double wells reinjection; tracer test; production well temperature

收稿日期:2023-03-08。

第一作者简介:薛宇泽(1988—),男,硕士,工程师,主要从事地热地质方面研究。地址:陕西省西安市经开区文景路26号陕煤地质科研办公楼,邮政编码:710021。E-mail:xyz-88111@163.com

通信作者简介:张玉贵(1989—),男,本科,工程师,主要从事水文地质与矿井地质工作。地址:陕西省韩城市金城路一三一队,邮政编码:715400。E-mail:491782203@qq.com

基金项目:陕西省创新能力支撑计划项目“陕西省地热钻井换热供暖一体化试验平台建设”(2021PT-028);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目“陕西省地热能高效利用技术“科学家+工程师”(2022KXY-039);自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室重大专项“不同型式地埋管换热性能试验研究”(ZP2020-1);陕西投资集团有限公司科技项目、陕西省煤田地质集团有限公司重大专项“陕西省韩城市东部断陷区岩溶地热水资源赋存规律研究”(SIGC2023-KY-05, SMDZ-2022ZD-3)。

地热能是一种稳定高效的可再生清洁能源,充分开发利用地热资源是调整国家能源结构、实现双碳目标的有效途径^[1-2]。岩溶热储地热作为水热型地热开发的一种类型,具有分布广泛、出水量大、易回灌和对环境影响较小等特点^[3]。回灌能够维持热储压力,是岩溶地热系统可持续开发的一项重要工作,但回灌也可能引起开采井温度下降,缩短地热系统寿命。正确把握采灌井之间的水力连通状况,是实现地热尾水科学回灌的先决条件^[4]。由于岩溶热储具有较强的非均质性与各向异性,其水动力过程非常复杂^[5],现有技术下无法直接测定采灌井之间的水力联系情况。示踪试验可量化流体流动状态^[6],刻画流体运移特征,是研究岩溶热储系统井间连通性最直观的技术手段^[7]。

云智汉^[8]选取硫氰酸铵(NH_4SCN)为示踪剂对咸阳孔隙性热储进行示踪试验,在试验期内未检测到示踪剂,对其产生的原因进行了分析。陈玉林^[9]在西安某小区对井同层位回灌试点进行了地热水示踪试验,约42 d开采井内示踪剂开始显现,52 d达到峰值,试验证明采灌井地热储层是连通的,示踪剂在地下运移的速度为0.19 m/h。吴丽莉等^[10]在山东郓城开展同层对井回灌试验和示踪试验,结果表明岩溶热储层内水力联系强。庞菊梅等^[11]以氟苯甲酸作为示踪剂对雄县地区开展了示踪试验,结果在观测井群中未检测到示踪剂,并运用水平裂隙介质模型对长期回灌可能引起的热储冷却进行了分析预测。刘桂宏^[12]采用等效渗流通道模型来定量解释非均质孔隙型热储的示踪试验数据,并提出基于示踪试验数据的非均质热储参数反演与开采井热突破预测的数值模拟方法。李元杰^[13]利用钼酸铵和碘化钾在北京城区进行对井回灌示踪试验,根据示踪试验结果求得渗透系数及区域热储岩石裂隙率,并对热储温度场演化进行模拟研究。

上述研究多集中于北京、西安、德州、雄安等地热资源丰富的地区,对于鄂尔多斯盆地东南缘韩城地区的地热研究尚不清楚。韩城地区近年来打出地热井七眼,取得初步成效,但受开采利用成本、技术条件、管理体制等因素的影响,该区地热资源开发利用程度总体上规模小、程度低、利用形式单一,造成地热资源的浪费^[14]。以鄂尔多斯盆地东南缘韩城地区岩溶热储为例,对该地区某地热工程开展对井回灌示踪试验,分析采灌井之间岩溶通道数量、几何形

态、地下水流速等问题,预测长期回灌条件下开采井温度变化,为该地区岩溶热储地热资源开发提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质构造

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部^[15],可划分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷及西缘冲断带6个一级构造单元^[16](图1)。

渭河盆地处于秦岭造山带与鄂尔多斯地块之间^[17],盆地整体表现为凹陷和断凸相间排列,可依次划分为3个区块,分别是西部隆起区、南部拗陷区以及北部斜坡区,其中南部拗陷区包括西安凹陷、固市凹陷、骊山凸起及咸渭凸起4个二级构造单元;北部斜坡区包括合阳—韩城浅凹、蒲城—富平浅凹及乾县斜坡3个二级构造单元^[18](图2)。

韩城地区地处祁吕贺兰山字形构造的前弧东翼,秦岭巨型纬向构造带的北缘,新华夏系汾河陆槽南端,地跨汾渭地堑和鄂尔多斯渭北隆起带2个构造

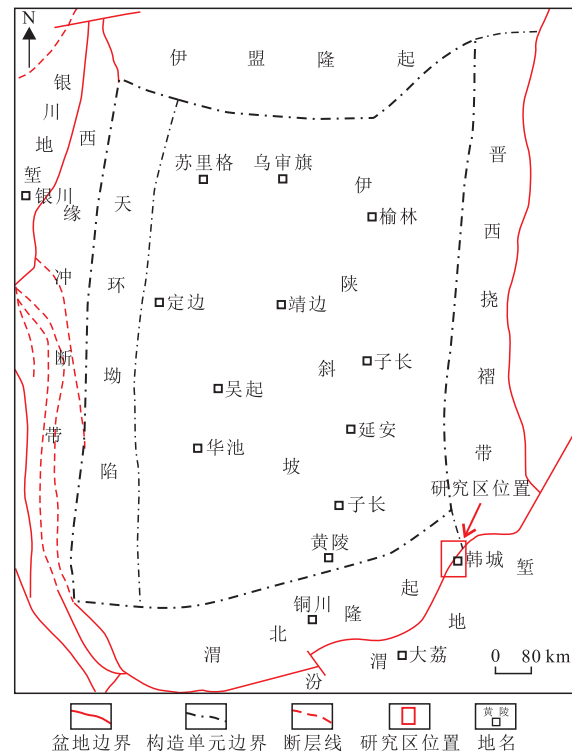


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分

Fig. 1 Structural unit map of Ordos Basin

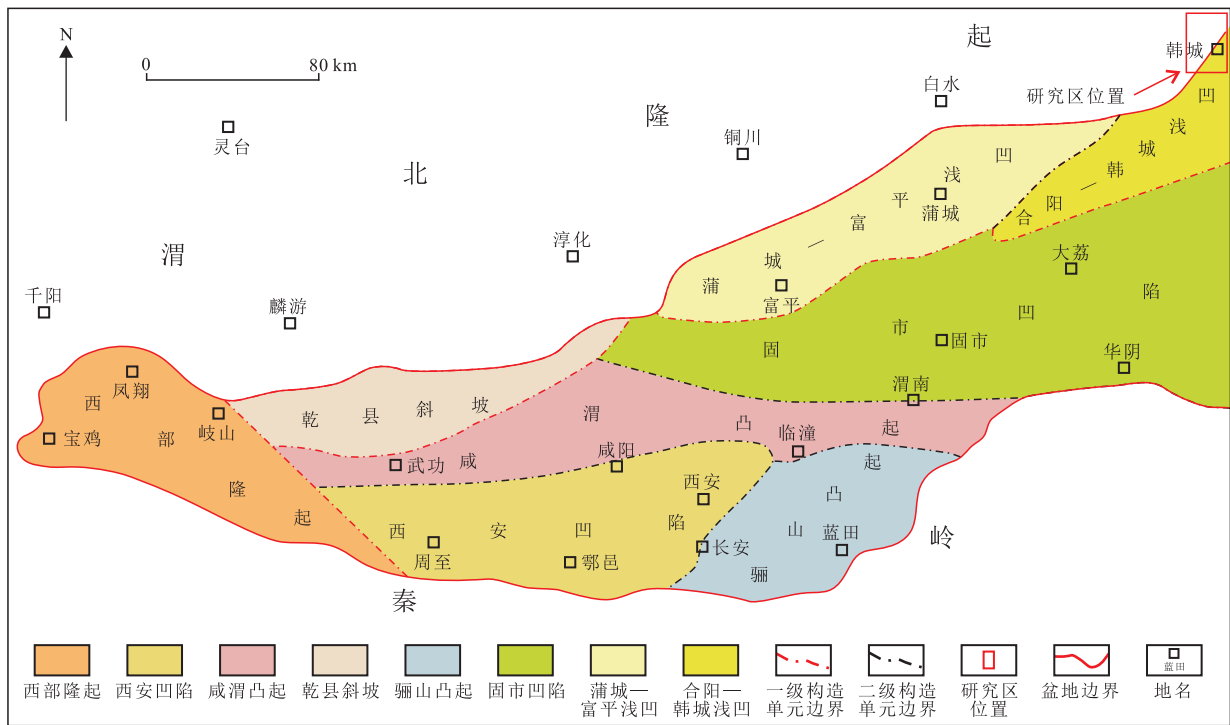


图2 渭河盆地构造单元划分
Fig. 2 Structural unit map of Weihe Basin

单元,是汾渭地堑与鄂尔多斯地台向斜的陕北盆缘褶皱区的过渡地带^[19]。断层是该区最发育的构造形式,其中韩城F1大断裂为研究区内规模最大的断裂^[14],为正断层,走向NE(北东) $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$,倾向SE(南东),倾角介于 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ^[20],该断裂自中生代以来活动至今,其下盘碳酸盐岩或涑水群片麻岩多与汾渭地堑的新近系、第四系黏性土对接^[19]。韩城地区以该大断裂(图3)为界分为2个单元:大断裂东南部上盘为断陷盆地,沉积了巨厚第四系松散沉积物,形成了地形平缓地区;大断裂西北部下盘为基岩山区,属于渭北隆起带的一部分,区内沟谷纵横,地形复杂,是煤炭资源的主要开发区^[21-22]。区内主要地层由老到新为太古界涑水群、古生界奥陶系、寒武系、石炭系、二叠系、中生界三叠系和新生界新近系与第四系。区内地热资源成因类型分为2类,分别为断裂裂隙带地温异常型和正常地温梯度增温型地热资源。前者为带状热储,主要分布在韩城市芝阳镇清水村一带;后者为面状热储,广泛分布于韩城F1大断裂东部断陷盆地内,为奥陶系马家沟组与峰峰组碳酸盐岩岩溶裂隙热储,热储顶板埋深介于2 109.00 ~ 2 902.55 m。

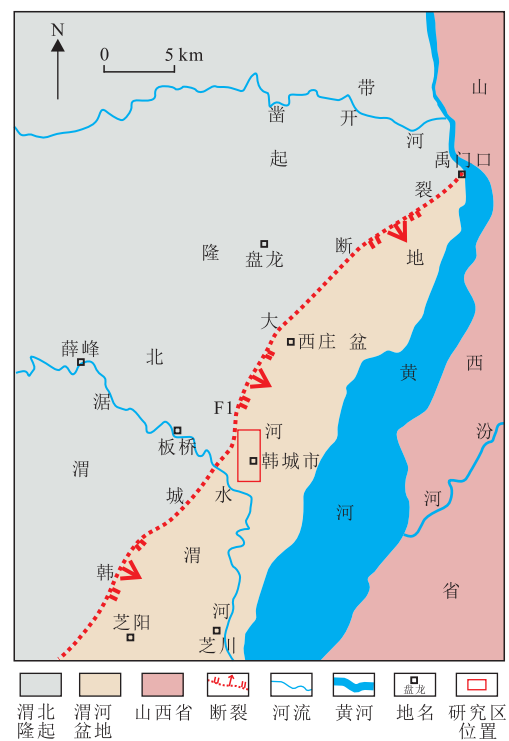


图3 鄂尔多斯盆地东南缘韩城F1大断裂位置
Fig 3 Hancheng F1 fault location in the South eastern margin of Ordos Basin

1.2 地热成因分析

在韩城 F1 大断裂西北部基岩山区,岩溶水主要由大气降水与地表河流补给,F1 大断裂褶皱裂隙构造集中,碳酸盐岩破碎,有利于岩溶地下水的富集(图4)。由于 F1 大断裂西北部碳酸盐岩层几乎全部与东南部新生界及三叠系地层接触,岩溶水因此被阻隔^[18],只能沿着 F1 大断裂继续向深部运移,运移至一定深度后进入断陷区内奥陶系地层;奥陶系峰峰组与马家沟组地层由灰岩、白云质灰岩、白云岩夹薄层泥灰岩组成,岩溶裂隙发育,因此,岩溶水进入断陷区后可以很好地储存下来。研究区的地壳相对较薄,同时深部古老的结晶基底及较密的岩层具有较高的热导率,进一步促进热量向上传递,形成热源加热岩溶水。断陷盆地内沉积较厚的第四系、新近系、三叠系、二叠系及石炭系地层,揭露厚度介于 2 109 ~ 2 906 m,岩性以砂黏土、砂泥岩为主,其孔隙度小,渗透率较低,导热导水能力差,是较好的隔热保温盖层^[22],地热水得以保存。当岩溶地热水遇到断裂时向上运移形成温泉,或通过人工钻井进行开采。

1.3 地热对井系统介绍

该对井系统位于韩城 F1 大断裂东南部断陷区内,有 1 口开采井和 1 口回灌井(图 5)。开采井为 1 号井(直井),三开井身结构,一开井径 444.5 mm,二开井径 222.2 mm,三开井径 152.0 mm,完井垂深 3 315.60 m,揭露奥陶系峰峰组和马家沟组厚度为 396.90 m;回灌井为 2 号井(斜井),完井垂深 3 406.72 m,完井斜深 3 443.10 m,一开井径 444.5 mm,二开井径 241.3 mm,三开井径 152.0 mm,揭露奥陶系峰峰组和马家沟组厚度 483.03 m。采灌井井口距离为 12.70 m,井底间距 300.00 m。

2 示踪试验过程

2.1 示踪剂选择

示踪剂的选择应遵循以下规则:①具有足够的化学稳定性和热稳定性,易溶于地热流体但不被储层岩石吸附,与储层流体不发生化学反应,与回灌流体配伍性好;②热储中示踪元素背景值足够低且波

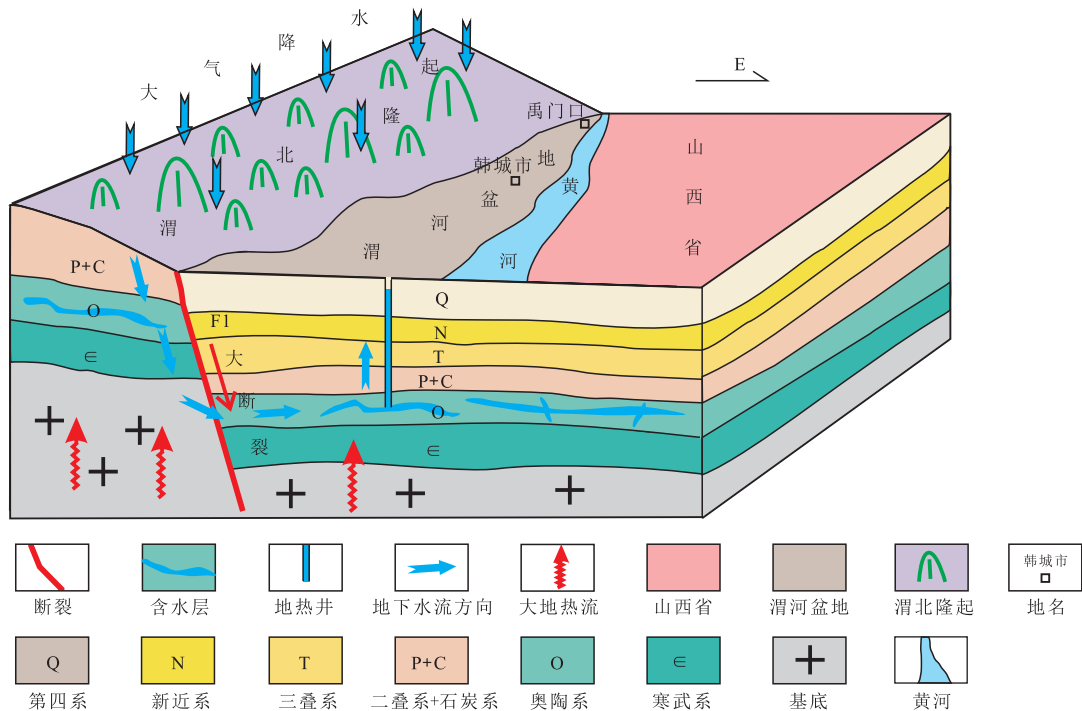


图4 鄂尔多斯盆地东南缘韩城 F1 大断裂地热成因模式

Fig 4 Geothermal genetic model of Hancheng F1 fault in the South eastern of Ordos Basin

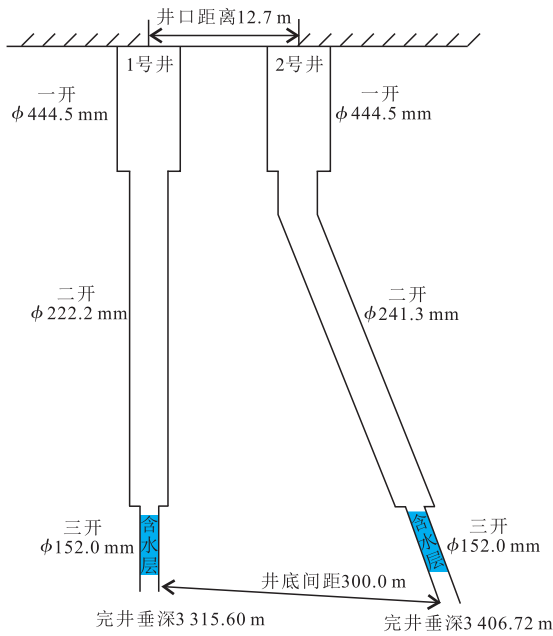


图5 地热对井成井结构示意图

Fig 5 Sketch diagram of geothermal double wells

动小;③对人体、动植物以及周边水体和其他各类工程无损害,不危害环境;④检测灵敏度高,且检测下限低于或接近本底背景值;⑤多元示踪时,示踪剂相互之间无干扰;⑥现场可操作性强,经济性满足设计要求^[23]。经过广泛调研以及背景值测试,初步选定 NH_4SCN 作为试验示踪剂并对示踪剂配伍性、热稳定性及吸附性等进行了前期试验,结果表明 NH_4SCN 与水的互溶性好,在高温条件下能够保持稳定不分解,并且不与地层物质发生化学反应,不被地层吸附,前期试验结果证明 NH_4SCN 满足示踪剂的选取要求。

2.2 示踪剂投放、采样及化验

示踪试验是在依托工程供暖季开始后进行的,供暖季开始于2021-11-15。根据建筑末端热负荷实际需求,1号井开采量为 $35.8 \text{ m}^3/\text{h}$,出水温度为 $82.6 \text{ }^\circ\text{C}$;2号井采用自然回灌的方式,回灌量为 $35.8 \text{ m}^3/\text{h}$,回灌温度为 $51.8 \text{ }^\circ\text{C}$,回灌率100%。示踪试验从2021-11-23T09:00:00启动,在示踪试验正式启动前,对井系统已经持续运行了7 d,回灌井内已无杂质。将1.3 t 硫氰酸铵放置特制容器内,加入1号井地热水进行搅拌,至 NH_4SCN 完全溶解,然后将 NH_4SCN 溶液快速泵注入2号井中。在注入示踪剂后立刻开始采样测试,初期采样频率为1 d/次,在首次检出示踪

剂质量浓度异常后加密为6 h/次。受依托工程供暖季的影响,示踪试验结束于2022-03-15,历时112 d,采集水样447件,所采水样在现场用国家标准方法分光光度法进行 SCN^- (硫氰酸根离子)质量浓度测试。示踪剂注入之前进行了3次回灌尾水空白样测试, SCN^- 的质量浓度分别为 0.090 、 0.094 、 0.095 mg/L ,求取平均值为 0.093 mg/L ,作为地热水的 SCN^- 本底背景值。

3 理论模型

3.1 示踪剂运移理论

岩溶热储最大的特点是其不均一性比较强,在非均质热储中,基于裂隙介质溶质运移模型,假设以稳定的流量开采与回灌,回灌水沿着 N 条通道(如裂隙通道带)从回灌井向开采井运移,且在通道中的流动是一维的。忽略分子扩散的作用,将示踪剂1次性注入到回灌井中,其中一部分沿着通道向开采井运移,结合示踪剂的质量守恒,则开采井示踪剂质量浓度的表达式为^[5,23]:

$$C(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_w m_i x_i}{2q_{\text{out}} t \sqrt{\pi D_i t}} \exp\left[-\frac{(x_i - u_i t)^2}{4D_i t}\right] \quad (1)$$

$$u_i = \frac{q_i}{\rho_w A_i \varphi} \quad (2)$$

$$D_i = \alpha_{L_i} u_i \quad (3)$$

$$q_i = \frac{m_i}{m} q_{\text{in}} \quad (4)$$

式(1)一式(4)中: $C(t)$ 是开采井中示踪剂质量浓度,单位 kg/m^3 ; N 为优势裂隙通道数; ρ_w 为水密度,单位 kg/m^3 ; m_i 为流经第 i 条裂隙通道中示踪剂的质量,单位 kg ; x_i 为第 i 条裂隙通道长度,单位 m ; q_{out} 为开采率,单位 kg/s ; t 为时间,单位 s ; D_i 为第 i 条裂隙通道中的纵向弥散系数,单位 m^2/s ; u_i 为第 i 条裂隙通道中的流速,单位 m/s ; q_i 为第 i 条裂隙通道中的回灌率,单位 kg/s ; A_i 为第 i 条裂隙通道截面积,单位 m^2 ; φ 为孔隙度,单位%; α_{L_i} 为第 i 条裂隙通道中的纵向弥散度,单位 m ; m 为投入示踪剂的质量,单位 kg ; q_{in} 为回灌率,单位 kg/s 。

在式(1)中,等号左边通过示踪试验已得到结果,等号右边有较多的未知数,如通道横截面积、纵向弥散度无法直接测定,需要通过示踪试验结果反分析求得。研究采用美国环境保护局研发的Qtracer2软件^[24]对岩溶通道相关参数进行反演计算,

该软件是一款基于示踪剂质量浓度历时变化曲线解译计算含水介质的几何形态、相关水文地质参数的软件,该软件已在多个项目验证^[25-28]。

3.2 热突破模型

通过示踪试验反演得到的岩溶裂隙通道参数可带入热突破模型中计算开采温度的变化规律,假设水-岩界面温度相等,采灌井之间存在 N 条流动通道,则开采井中的水温 $T(t)$ 可通过以下表达式计算^[3,11]:

$$T(t) = T_0 - \frac{q_{in}}{q_{out}} \sum_{i=1}^N \left[\frac{m_i}{m} (T_0 - T_i) \right] \quad (5)$$

其中 T_i 为第 i 条通道出口处的温度,表达式为:

$$T_i = T_{in} + (T_0 - T_{in}) \operatorname{erf} \left[\frac{xk_r h}{q_i c_w \sqrt{k_r (t - x/\beta) / \rho_r c_r}} \right] \quad (6)$$

$$\beta = \frac{q_i c_w}{(\rho c)_i A} \quad (7)$$

$$(\rho c)_i = \rho_w c_w \varphi + \rho_r c_r (1 - \varphi) \quad (8)$$

式中: $T(t)$ 为开采井出水温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; T_i 为第 i 条通道出口处的温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; h 为通道平均直径,单位 m ; x 为岩溶裂隙通道长度,单位 m ; T_0 为储层原始温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; c_w 为水的比热容,取值 $4\,200$,单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; k_r 为储层的导热系数,取值 2.5 ,单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ_w 为水的密度,取值 $1\,000$,单位 kg/m^3 ; ρ_r 为热储层的密度,取值 $2\,400$,单位 kg/m^3 ; c_r 为热储层比热容,取值 900 ,单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; $(\rho c)_i$ 表示流动通道中材料的体积热容,单位 $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$; A 为通道横截面积,单位 m^2 ; φ 为孔隙度,取值 6 ,单位 $\%$ 。

4 数据结果分析

4.1 示踪剂响应特征分析

4.1.1 曲线一般特征

在示踪剂投放后 25 h 时检测到 SCN^- 质量浓度前晕; 175 h 时 SCN^- 质量浓度比本底值已经高出一个数量级,为 1.225 mg/L ; 325 h 时 SCN^- 质量浓度达到峰值,为 11.154 mg/L ,高出背景值3个数量级,示踪效果明显,随后 SCN^- 质量浓度开始下降; 14 d 至 38 d , SCN^- 质量浓度下降速率比较快; 38 d 后下降变缓,最终趋于稳定;供暖季结束时的 SCN^- 示踪剂质量浓度为 1.974 mg/L 。共采集样品 447 件,绘制 SCN^- 质量浓

度曲线变化图(图6),整体来看曲线形态为单峰型,试验过程只出现了1个质量浓度峰值,峰值陡升陡降;在供暖季结束时示踪剂质量浓度尚未达到本底值,出现了拖尾现象。

4.1.2 回收率

据反演计算 NH_4SCN 的回收质量为 357.21 kg ,试验共投入 $1\,300\text{ kg}$ 示踪剂,回收率为 27.477% ,表明有 27.477% 的回灌水被开采井捕获,剩余的回灌水通过其他裂隙出口或通道流走,向其他方向排泄。同时本次回灌率保持在 100% ,表明2井之间存在其他裂隙与支管道的补给。

4.1.3 示踪剂运移时间及速度

示踪剂在开采井首次被检出的时间为第 25 小时,峰值时间为第 325 小时,示踪剂在地下的平均运移时间为 $1\,217.3\text{ h}$ 。示踪剂初现时的流速为地下水的最快流速,出现峰值时的流速为平均流速^[29],因此,地下水的平均流速是根据示踪剂的平均运移时间计算,为 8.87 m/d ,最快流速是根据示踪剂最快到达时间计算,为 432.00 m/d 。

4.2 岩溶裂隙通道分析

4.2.1 岩溶通道几何特征

示踪剂运移距离可以视为是岩溶裂隙通道长度,但实际长度不能直接确定,通常以投放点与接收点间直线距离来代替,国外学者经过大量统计分析,

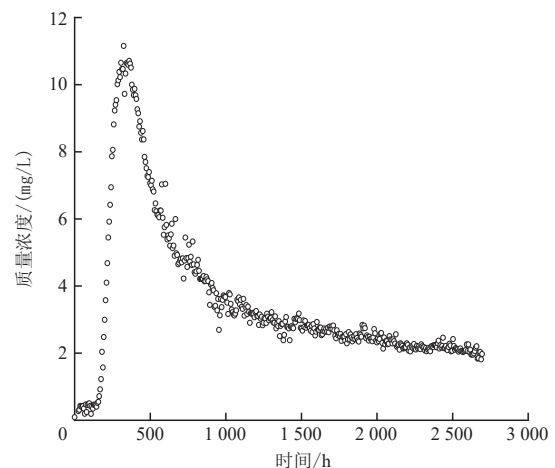


图6 开采井示踪剂(SCN^-)质量浓度
Fig. 6 Tracer (SCN^-) concentration data curve of production well

认为岩溶裂隙通道的实际长度约等于直线距离的1.5倍^[25]。对井井底直线距离为300 m,修正后通道长度为450 m;采灌井间的岩溶管道体积为43 573 m³,岩溶通道湿表横截面积为96.842 m²,通道平均直径为11.1 m,纵向弥散系数为0.011 2 m²/s,地下水最大流速为432.00 m/d,平均流速为8.87 m/d。

4.2.2 岩溶裂隙通道示意图

曲线形态呈单峰型特征,推测2井之间只存在1条直接联系岩溶裂隙通道,峰值陡升陡降,说明2井间的水力联系强烈,同时SCN⁻质量浓度响应曲线出现拖尾现象,推测2井之间发育有溶潭,溶潭稀释了示踪剂质量浓度,导致质量浓度曲线表现出拖尾现象^[29]。示踪剂的回收率为27.477%,表示27.477%的回灌水从回灌井流向开采井,推测2井之间岩溶管道还可能存在其他的裂隙出口或者岩溶通道分流;同时回灌率一直保持在100%,表明有其他支管道向开采井汇流补给(图7)。

4.3 热突破预测

将相关参数带入式(5),根据现有回灌参数计算,预测100 a内开采水温变化情况(图8),结果显示在最开始2 a开采井温度下降最快,到第3年下降速度逐步放缓,持续开采100 a后,开采井的温度下降了约8.31℃。

该预测是在采灌系统持续不间断运行为假设前

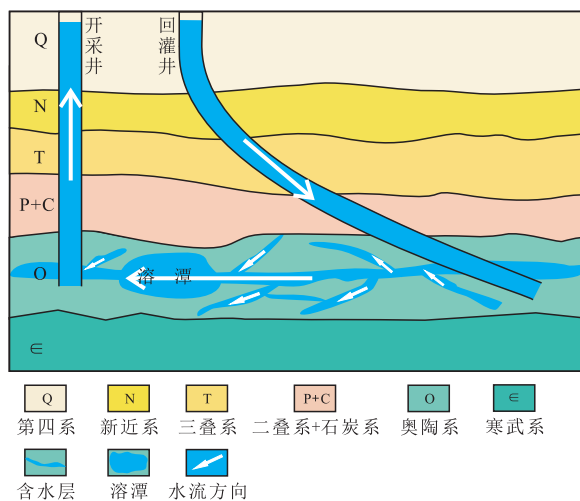


图7 采灌井之间岩溶裂隙通道推测示意图
Fig. 7 Speculation diagram of karst fracture path between production well and reinjection well

提进行的模拟计算,实际工况下抽水回灌不会持续进行,1 a内里供暖期仅有4个月,经过1个停采期之后,对井系统地下热储资源得到大地热流的充分补给,热储层在得到一定程度恢复后重新进入下个开采循环,因此,实际情况会比模拟计算更“乐观”。

5 结论

1) 韩城F1大断裂是研究区内断陷盆地岩溶水的主要补水通道,岩溶水通过F1大断裂从下盘基岩山区向深部运移进入上盘断陷区奥陶系地层,受到变质岩基底加热形成地热水;新生界松散层作为盖层,有效阻止热量散失,更好地保存岩溶地热水。

2) 选取NH₄SCN作为示踪剂,开展了对井回灌示踪试验。示踪剂回收率为27.477%,结果表明:采灌井之间存在1条直接联系的岩溶裂隙主通道,长度约为450 m,同时可能存在其他次级通道进行分流或汇入;推测在主通道上发育有溶潭。

3) 结合示踪剂质量浓度历时变化曲线,运用Qtracer2软件进行反演计算,计算了岩溶裂隙通道的储水量、湿表面横截面积、通道平均直径、地下水最大流速、地下水平均流速等参数,结果表明采灌井之间的水力联系密切。

4) 根据开采井温度预测,开采井温度2 a内下降最快,第3年开始下降速度逐步放缓,持续开采100 a后开采井的温度降低了约8.3℃,预测在现有生产工况下,开采井出水温度在100 a内不会剧烈下降,符合生产要求。

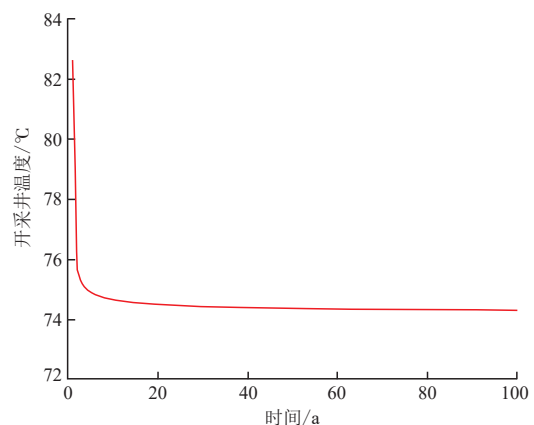


图8 开采井温度变化
Fig. 8 Temperature variations in production well

参考文献

- [1] 薛宇泽, 张玉贵, 韩元红, 等. 关中盆地韩城大断裂东南地区浅部地温垂向分布特征浅析[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(6): 843-849.
XUE Yuze, ZHANG Yugui, HAN Yuanhong, et al. Vertical distribution characteristics analysis of shallow stratum geothermal temperature field in the Southeastern Hancheng fault, Guanzhong Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 843-849.
- [2] 李健, 武江元, 杨震, 等. 地热发电技术及其关键影响因素综述[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 1-8.
LI Jian, WU Jiangyuan, YANG Zhen, et al. Review of geothermal power generation technologies and key influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 1-8.
- [3] 庞菊梅, 庞忠和, 孔彦龙, 等. 示踪实验在岩溶热储井间连通性研究中的应用: 2014年中国地球科学联合学术年会——专题4: 地热: 从地表到深部论文集[C]. 北京: 北京伯通电子出版社, 2014: 453.
PANG Jumei, PANG Zhonghe, KONG Yanlong, et al. Interwell connectivity in a karstic geothermal reservoir through tracer tests[C]// 2014 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union (CGU); Special Topic 4: Geothermal: From Surface to Deep. Beijing: Beijing Botong Digital Publishing House, 2014: 453.
- [4] 赵志宏, 刘桂宏, 谭现锋, 等. 基于等效渗流通道模型的地热尾水回灌理论模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 158-164.
ZHAO Zhihong, LIU Guihong, TAN Xianfeng, et al. Theoretical model of geothermal tail water reinjection based on the equivalent flow channel model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 158-164.
- [5] 殷肖肖, 沈健, 赵艳婷, 等. 集中采灌条件下碳酸盐岩热储群井示踪试验[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1984-1994.
YIN Xiaoxiao, SHEN Jian, ZHAO Yanting, et al. Study on tracer test of carbonate geothermal reservoir under centralized pumping and re-injection conditions[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(6): 1984-1994.
- [6] AXELSSON L G, BJORNSSON G, MONTALVO F. Quantitative interpretation of tracer test data[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 2005.
- [7] 庞菊梅, 庞忠和, 孔彦龙, 等. 岩溶热储井间连通性的示踪研究[J]. 地质科学, 2014, 49(3): 915-923.
PANG Jumei, PANG Zhonghe, KONG Yanlong, et al. Interwell connectivity in a karstic geothermal reservoir through tracer tests[J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(3): 915-923.
- [8] 云智汉. 深层孔隙型热储地热尾水回灌堵塞机理及示踪技术研究——以咸阳回灌二号井为例[D]. 西安: 长安大学, 2014.
YUN Zhihan. Clogging mechanism and tracer technique research of deep-porous type geothermal water re-injection-take Xianyang re-injection well No. 2 for example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [9] 陈玉林. 西安地热田地热水回灌试验研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
CHEN Yulin. Geothermal re-injection test in Xi'an city[D]. Xi'an: Northwest University, 2012.
- [10] 吴丽莉, 孟凡奇, 董玉龙, 等. 山东省郯城县岩溶热储回灌试验[J]. 山东国土资源, 2017, 33(6): 38-42.
WU Lili, MENG Fanqi, DONG Yulong, et al. Experimental study on karst geothermal reservoir reinjection in Yuncheng county of Shandong province[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(6): 38-42.
- [11] 庞菊梅, 王树芳, 孙彩霞, 等. 雄县地热田示踪试验的解释及分析[J]. 城市地质, 2011, 6(2): 12-17.
PANG Jumei, WANG Shufang, SUN Caixia, et al. Interpretation and analysis of tracer test in Xiongxin geothermal field[J]. Urban Geology, 2011, 6(2): 12-17.
- [12] 刘桂宏. 城市深层热储热水力多场耦合模拟方法与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LIU Guihong. Numerical method for the coupled THM processes in deep geothermal reservoirs at city scale and application[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2020.
- [13] 李元杰. 地热回灌示踪技术及热储模拟实验研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2010.
LI Yuanjie. Study on geothermal reinjection of tracer technology and simulation of thermal energy storage[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 2010.
- [14] 薛超, 柴宏有, 葛毓, 等. 韩城地区中深层岩溶地热资源热储特征及潜力评价[J]. 陕西煤炭, 2021, 40(1): 18-21.
XUE Chao, CHAI Hongyou, GE Yu, et al. Thermal reservoir characteristics and potential evaluation of karst geothermal resources in Hancheng area[J]. Shaanxi Coal, 2021, 40(1): 18-21.
- [15] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 19-40.
FU Jinhua, DONG Guodong, ZHOU Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19-40.
- [16] 杨华, 张军, 王飞雁, 等. 鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 7-11.
YANG Hua, ZHANG Jun, WANG Feiyan, et al. Characteristic of paleozoic gas system in E'ERDUOSI Basin[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(6): 7-11.
- [17] 刘志武, 白勇, 周立发. 渭河盆地结构及其油气成藏地质条件[J]. 石油实验地质, 2016, 38(5): 584-591.
LIU Zhiwu, BAI Yong, Zhou Lifa. Basin structure and hydrocarbon accumulation conditions of the Weihe Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 584-591.
- [18] 李智超. 渭河盆地新生代岩相古地理及环境演化[D]. 西安: 西北大学, 2016.
LI Zhichao. The lithofacies paleogeography and paleoenvironmental evolution of the cenozoic in the Weihe Basin, China[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- [19] 李建宁, 马汉田, 王英, 等. 晋陕河津——韩城地区岩溶地下水勘查报告[R]. 太原: 山西省地质调查院, 2004.

(下转第780页)

- [15] 胡俊杰. GD油田聚合物驱调剖技术研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2019.
HU Junjie. Research on polymer flooding and profile control technology in GD Oilfield[D]. Dongying: China University of Petroleum(East China), 2019.
- [16] 张昕. 低渗透油藏凝胶调剖体系优选及注入参数优化研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
ZHANG Xin. Study on optimization of gel profile control system and injection parameters for low permeability reservoirs[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [17] 陈玲玲. 聚合物凝胶调剖剂运移特性及封堵效果[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(4): 122-130.
CHEN Lingling. Migration characteristics and plugging effect of polymer gel profile control agent[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(4): 122-130.
- [18] CAO W J, XIE K, LU X G, et al. Effect of profile-control oil-displacement agent on increasing oil recovery and its mechanism[J]. Fuel, 2019, 237: 1151-1160.
- [19] 张娜, 元福卿, 魏翠华, 等. 普通稠油油藏聚合物驱提高采收率研究与实践—以孤岛油田B21单元为例[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 101-106.
ZHANG Na, YUAN Fuqing, WEI Cuihua, et al. Research and practice of enhanced oil recovery by polymer flooding in ordinary heavy oil reservoirs: Taking Block B21, Gudao Oilfield as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 101-106.
- [20] 郑昕, 姚秀田, 夏海容, 等. 稠油化学堵调降黏复合驱油体系构建及驱油机理分析[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 122-128.
ZHENG Xin, YAO Xiutian, XIA Hairong, et al. Establishment of combined viscosity reduction flooding system for chemical water shutoff and profile control in heavy oil reservoirs and analysis of its mechanism[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 122-128.

(编辑 尹淑容)

(上接第764页)

- LI Jianning, MA Hantian, WANG Ying, et al. Karst groundwater investigation report in the Hejin-Hancheng Region of Shanxi Province and Shaanxi Province[R]. Taiyuan: Geological Survey Institute of Shanxi Province, 2004.
- [20] 阎凤忠, 贺勇, 安卫平, 等. 韩城——侯马断陷区主要活动断裂的调查[J]. 山西地震, 1987, 15(3): 9-13.
YAN Fengzhong, HE Yong, AN Weiping, et al. Investigation of main active faults in the Hancheng-Houma fault depression zone[J]. Earthquake Research in Shanxi, 1987, 15(3): 9-13.
- [21] 代革联. 地质构造对韩城矿区水文地质特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 62-67.
DAI Gelian. The effect of geology structure on hydrogeology characteristics of Hancheng Mining Area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(7): 62-67.
- [22] 周武. 鄂尔多斯地块东南缘与汾渭地堑接壤地带寻找深部岩溶地热水新突破[J]. 地下水, 2020, 42(4): 106-107.
ZHOU Wu. A new breakthrough was made in the search for deep karst geothermal water in the Southeastern edge of the Ordos block and the border zone of Fenwei Graben[J]. Ground Water, 2020, 42(4): 106-107.
- [23] 能源行业地热专业标准化技术委员会. 热储示踪试验技术规程: NB/T 10703—2021[S]. 北京: 中国石化出版社, 2022.
Energy industry geothermal energy standardization technical committee. Technical specification for thermal storage tracer test: NB/T 10703—2021[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2022.
- [24] The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems[R]. USA: United States Office of Research and EPA, 2002.
- [25] 杨平恒, 袁道先, 蓝家程, 等. 基于在线高分辨率监测和定量计算的岩溶地下水示踪试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 103-108.
YANG Pingheng, YUAN Daoxian, LAN Jiacheng, et al. Tracing test of karst aquifer based online, high-resolution monitoring and quantitative calculation[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(2): 103-108.
- [26] 姜光辉, 郭芳, 林玉石, 等. 岩溶管道流示踪试验的定量解析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(增刊1): 384-387.
JIANG Guanghui, GUO Fang, LIN Yushi, et al. Analysis of quantitative tracing test in karst conduit[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(suppl. 1): 384-387.
- [27] 徐尚全, 王鹏, 焦杰松, 等. 高精度在线示踪技术在岩溶地下水文调查中的应用[J]. 工程勘察, 2013, 41(2): 40-44.
XU Shangquan, WANG Peng, JIAO Jiesong, et al. Application of high-precision online tracer technique in the hydrogeological investigation of karst groundwater[J]. Geotechnical Investigation & surveying, 2013, 41(2): 40-44.
- [28] 张志强, 张强, 班兆玉, 等. 基于示踪试验的岩溶管道及水力参数定量解析[J]. 人民长江, 2015, 46(11): 80-83.
ZHANG Zhiqiang, ZHANG Qiang, BAN Zhaoyu, et al. Quantitative analysis of karst conduit and its hydraulic parameters based on tracer test[J]. Yangtze River, 2015, 46(11): 80-83.
- [29] GOLDSCHIEDER N, PRONK M, MEIMAN J, et al. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology[J]. International Journal of Speleology, 2008, 37(1): 27-40.
- [30] 李腾芳, 覃小群, 黄奇波, 等. 岩溶区地下水示踪试验及曲线特征[J]. 中国矿业, 2019, 28(增刊2): 497-498
LI Tengfang, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, et al. Groundwater tracer test and curve characteristics in karst area[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(suppl. 2): 497-498.

(编辑 郭群)