

天津地热对井回灌系统中的同位素示踪技术

孙宝成, 曾梅香, 林 黎, 赵苏民

(天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘 要:为深入分析地热回灌开采中回灌水运移规律、求证热储参数,笔者选取二组中元古界雾迷山组地热对井,分别注入放射性同位素³⁵S($T_{1/2} = 87$ 天)、¹²⁵I($T_{1/2} = 60$ 天)进行示踪试验,并分别于第130天、51天检出峰值,以此数据计算出的热储层的渗透系数、导水系数等有关参数,与传统的抽水试验算出的结果吻合良好;注入示踪剂在地层中的运移方向也与抽水试验观测到的结果完全一致,且直观形象、检出精度更高。同位素示踪技术能为进一步深入研究热储层在回灌前后压力场、温度场、水化学场的变化特征提供大量基本数据,也为天津乃至华北地区地热资源实施循环开发提技术保障。

关键词:地热资源;回灌开采;同位素;示踪试验

中图分类号: P641.25

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 4135(2005)03 - 0187 - 06

1 引言

地热资源大规模的开发利用始于 20 世纪 70 年代的世界能源危机。在开发的初期,由于人们对地热资源认识不够,加上手段不完善,致使地热田过量开采,热储水位下降迅速,资源浪费严重。针对这一问题,法国、美国、新西兰、冰岛等发达国家已竞相研究出了一系列新的地热开采方法,其中最重要的手段就是进行回灌开采^[1~5]。该方法得到了广泛应用,获得了很好的效果。

华北平原广泛分布着中低温地热水资源,尤其在天津地区蕴藏量十分丰富,也是全国最早开发利用地热的地区之一。至 2004 年底,在天津已纳入管理的地热井共有 251 眼(其中含回灌井 13 眼),热流体年开采量达 2 468 万立方米,采暖面积 947 万平方米,地热供暖占全国 77%。

地热资源是可再生资源。由于过量开采,使热储层水位持续下降,地热井产水能力减弱,开采成本增加;开发利用效率低,弃水温度过高,长期排放势必造成资源的严重浪费和弃水中有害物质及余热对环境造成污染。近年来,天津市政府从经济社会可持续发展角度出发,对地热资源实行了回灌开采。目前天津地区回

灌开采的规模正逐渐加大,这对回灌开采的研究提出了更高的要求。

同位素示踪试验是回灌研究中最重要、最直观的工作方法之一。在回灌开采技术较成熟的日本、冰岛等国先后都进行过地热对井回灌示踪试验,取得了一定的经验和成果^[6]。我国也进行过一些尝试性利用同位素示踪技术工作,但主要是在油田回灌试验中进行了应用,在地热开采中开展同位素示踪回灌试验还处于探索阶段^[7]。但近年伴随着回灌开采规模的扩大,示踪技术已多次在天津地热回灌开采研究中得以运用。通过进行专项示踪试验研究,选择可追踪的化学元素或同位素作为试剂加入回灌水中,随回灌水注入回灌井中进入地热储层,可以监测区内所有开采井运行状况、动态特征,获得开展研究的原始野外数据。用示踪试验数据绘制出示踪剂响应曲线,确定示踪剂峰值到达时间,对分析回灌水运移方向、速率等规律,研究热储层在回灌前后压力场、温度场、水化学场的变化,进而完善地质模型并建立回灌数学模型^[8]。因此,示踪技术在地热回灌开采中具有直观、量化、形象等优势。

2 天津市回灌研究及示踪回灌研究的现状

天津是全国开展回灌研究最早的地区,地热

收稿日期:2005 - 05 - 17

基金项目:天津市规划和国土资源局矿产资源补贴攻关项目

作者简介:孙宝成(1965 -),研究生,高级工程师,长期从事地热勘查研究工作, E-mail: sbccccc@sina.com。

研究程度较高。三十多年前已开展了多个大型地热田的勘查和研究工作,积累了丰富的工作经验。在进行地热资源勘查、研究的同时,对回灌开采的研究也逐渐深入。先后在大港区、塘沽地区对第三系明化镇组、馆陶组底砾岩孔隙型热储层进行过回灌研究。基岩岩溶裂隙型热储的回灌开采是从 1995 年开始的,并先后进行了二次规模较大、历时较长的示踪回灌试验,取得了较详实的示踪回灌数据,为进一步深入研究天津地区基岩回灌开采特征提供了基础条件。

3 同位素示剂技术在天津地热回灌开采中的应用

3.1 关键技术内容

选择某种适合研究区内地质特征、地热地质条件的元素的同位素作为示踪剂加入回灌水中,随回灌水注入回灌井中进入地热储层,在周边观测井中获得示踪剂响应数据。收集回灌过程中及回灌后热流体在热储层中运移信息,绘制示踪剂响应曲线,计算示踪峰值到达时间,从而研究回灌流体注入地层后在热储层中的动态特征,分析回灌水在地层中的“冷”锋面运移方向、速率等规律,确定引起的“冷”水域大小及其影响范围,对

回灌水在热储层中的运移特征作定性分析^[9]。

3.2 同位素示踪回灌试验实例

3.2.1 基本情况

试验时间:2001 年 11 月 28 日 ~ 2002 年 5 月 20 日,历时 173 天。

试验回灌井:天津市河西区珠江道一商储运公司回灌井 HX - 25B、天津市河东区嘉华小区回灌井 HD - 15。

同位素示踪剂:³⁵S(T_{1/2} = 87 天)、¹²⁵I(T_{1/2} = 60 天)。

3.2.2 地热井 HX - 25B 同位素示踪回灌试验

(1) 试验井场地热地质条件

回灌井 HX - 25B 地热井在构造位置上位于王兰庄地热田沧县隆起双窑凸起的北部,控制性断裂为走向北西向的海河断裂及走向北北东向的白塘口西断裂。目的层为中元古界蓟县系雾迷山组热储层,岩性主要为厚层状白云岩、白云质灰岩。岩溶裂隙比较发育,热储条件优越。根据抽水试验资料,该井渗透系数 $Ky_2 = 14.62 \text{ m/d}$,导水系数 $Ty_b = 292.5 \text{ m}^2/\text{d}$ 。该井与储运生产井 HD - 25 井形成同层采灌结合对井(见图 1),从 1996 年开始进行回灌开采,至今运行状况良好,回灌率在 80% 以上。

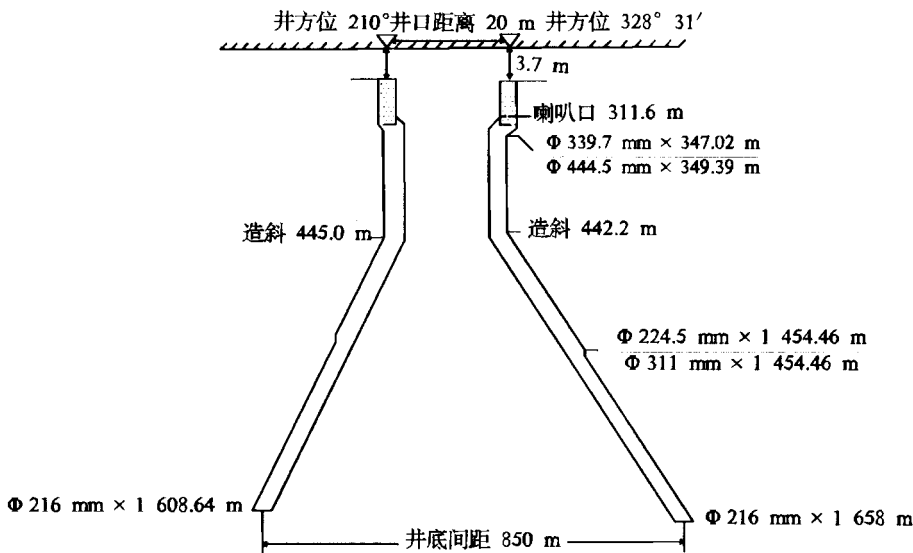


图 1 储运公司地热对井成井结构示意图

HX 25 生产井 HX 25B 回灌井

Fig. 1 Sketch map for pair geothermal wells of transportation and reservation corp.

HX 25 pumping Well, HX 25 B recharging well locality

(2) 同位素示踪试验

考虑到实验点坐落在居民区,为不影响生活热水的使用,选用半衰期短效的同位素作示踪剂。2001 年 11 月 29 日在回灌井 HX-25B 井中投入 $^{35}\text{S} \sim 350 \text{ mCi} (= 1.3 \times 10^{10} \text{ Bq})$,检测灵敏度约 0.5 Bq 。观测取样孔分别选取生产井储运 HX-25 井、纯真里 HX-14 井、尖山 HX-26 井、中科 HX-13 井(表 1)。取 5 升水样进行分析化验,其示踪剂量约比检测灵敏度高 20 倍。取出后立即加 1 毫升稳定剂,盖紧瓶盖,室

温放置。每次取样量不超过 5 升 $\pm 10\%$ 。各井取样桶均专井专用。取样频率如下:

- 示踪剂注入前所有参与试验井(包括观测生产井、回灌井)分别先取二个原始背景样;
- 示踪剂注入后自当日算起一周内,每天每井取样两次:早 9:00 一次,晚 9:00 一次;
- 第二周,每天每井取样一次:早 9:00 一次;
- 第三周至实验结束,每井两天取样一次,时间为 9:00。

表 1 试验点 HX-25B 回灌井及观测孔基础数据表

Table 1 The base data for HX25B recharge well and observation well

类别	项目	井号	井深(m)	取水段厚(m)	井口水温()	单位涌水量($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$)	备注
回灌井		HX-25B	1 658.00	156.00		自流	K = 14.62 (m/d) T = 292.5 (m^2/d)
取样观测孔		HX-25	1 608.69	66.69	95	9.8	
		HX-26	1 629.00	92.00	89	自流	
		HX-14	1 911.00	271.00	88	自流	
		HX-13	2 748.52	500.00	93		
同位素试验	2001 年 11 月 29 日注入 350 mCi 的 ^{35}S						

试验点各地热井井底距离见图 2。该组同位素示踪试验历时 172 天,共取检测样品 340 余个,获得有效数据 340 个(数据为减去本底并校正到注入日期 2001 年 11 月 29 日)。该组试验中的取样观测孔 HX-14 井在注入同位素 ^{35}S 后第 53 天首次检出示踪剂(图 3),并在 86 天出现一个相对高值,大约在 126 天后示踪剂成份大量检出,至 130 天达到最高峰值,而 150 天后示踪剂则骤然减少,显示出一个完整的试验周期。其余各观测孔均未检出示踪剂成份。

根据抽水试验资料显示,回灌井 HX-25B 与邻近各生产井之间,只与 HX-14 井有微弱水力联系,这一点从示踪剂试验中得到较好验证。根据示踪试验,反映出在该试验井场中,主要影响断裂为北西向的海河断裂,主裂隙方向为北西向,注入水流方向是沿主裂隙北西方向运移的。HX-25B 与 HX-26 的井底距离大约为 1 939 m,以示踪剂 ^{35}S 同位素峰值出现时间为 130 天计算,则回灌水从 HX-25B 井到 HX-26 井的速率大约为 14.9 m/d。而根据 HX-25B 井的抽水试验资料计算出的渗透系数 K_{y2}

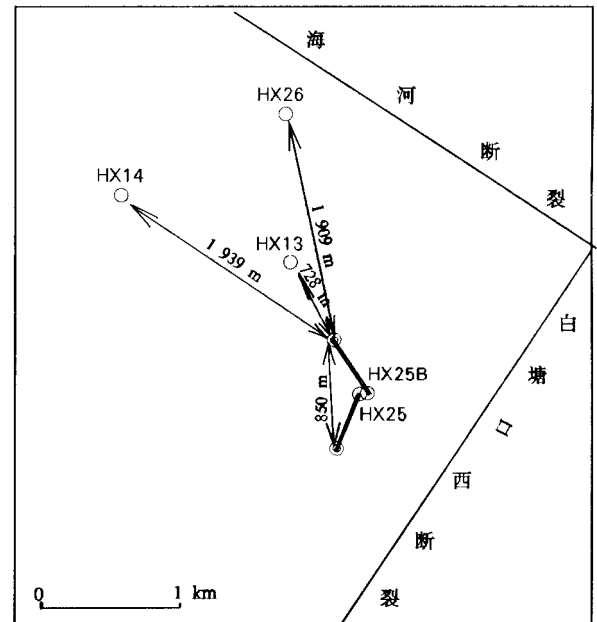


图 2 试验点热井井底距离示意图

Fig. 2 Sketch map showing the distance between the bottom of the experiment geothermal wells

= 14.62 m/d,两者结果比较吻合。

由此可见,在回灌水运移方向、速率等方面,示踪剂试验均与抽水试验吻合较好,说明示

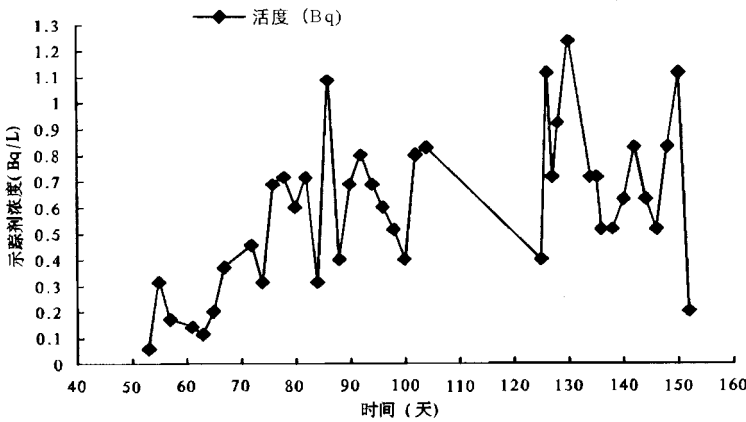


图 3 观测孔 HX-14 井 ³⁵S 响应曲线

Fig. 3 The response curve for observation well HX14. ³⁵S

踪试验对分析回灌水运移方向、速率等规律均有较好效果。反过来,也可以用示踪数据来验证含水地层的水文地质参数,且结果具有更直观、量化、形象等特点。

3.2.3 试验点 HD-15 井同位素示踪回灌试验

(1) 试验井场地地质条件

回灌井 HD-15 地热井位于天津市河东区唐家口新村四段嘉华小区。地质构造位于沧县隆起潘庄凸起的西南边缘,起控制作用的断裂主要有海河断裂、天津断裂和李七庄断裂,HD-15 井处于被带状海河断裂、李七庄断裂所切割形成的

局部断块上。目的层均为中元古界蓟县系雾迷山组热储层,岩性为白云岩,裂缝较发育。该回灌井与生产井 HD-14 井为一采一灌同层对井,从 2000 年开始连续进行回灌开采,运行效果良好,回灌率大约 60% ~ 80%。

(2) 同位素示踪试验情况

2001 年 11 月 28 日,在回灌井 HD-15 井中投入 ¹²⁵I ~ 350 mCi (= 1.3 × 10¹⁰ Bq),检测灵敏度 ~ 0.5 Bq。观测取样孔分别选取生产井嘉华 HD-14 井、十四经路 HD-08 井、十五经路 HD-05 井、华馨 HD-12 井(表 2),取样方法同上组。

该组同位素示踪试验历时 114 天,共取检测样品 300 余个,获得有效数据 292 个(数据为减去本底并校正到注入日期 2001 年 11 月 28 日)。该组试验中取样观测孔 HD-14 井注入同位素 ¹²⁵I 后第 4 天即检出示踪剂(图 4),并在第 13 天、19 天均出现相对高值。大约在 40 天后示踪剂成份大量检出,至 51 天达到最高峰,则 65 天后示踪剂则逐渐减少。

表 2 试验点 HD-15 回灌井及观测孔基础数据表

Table 2 The base data for experiment HD 15 recharged and observation well

项目	井号	井深 (m)	取水段厚 (m)	水温 ()	涌水量 (m ³ /h.m)	与回灌井井底距离 (m)
回灌井	HD-15	2 750 (斜深)	250.00			
取样观测孔	HD-14	3 150 (斜深)	644.00	85	140	937.00
	HD-05	2 450.00	33.49	84	140	1 100.00
	HD-08	2 610.87	416.87	85	140	677.48
	HD-12	3 068.2	519.14	89	109	2 000.00
同位素试剂	2001 年 11 月 28 日注入 350 mCi ¹²⁵ I					

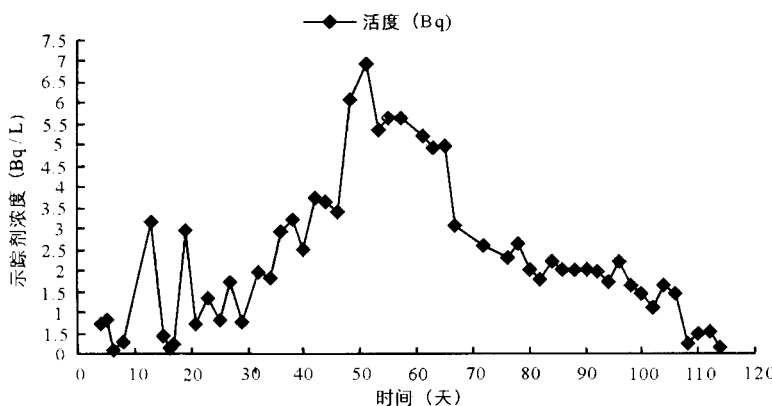


图 4 观测孔 HD-14 井 ¹²⁵I 响应曲线

Fig. 4 The response curve for observation well HD-14 ¹²⁵I

该试验井组的其余各观测孔均未检出示踪剂成份。

示踪试验结果,揭示了该试验点井场地质有关信息:回灌井 HD-15 与周围其它生产井无水力联系;回灌井内质点渗流方向为由西向东北沿北北东向运移,运移速率为 18.24 m/d。据钻探、水文地质等料,该区属山岭子与王兰庄两大地热田交汇处,回灌井 HD-15 井

处于被带状海河断裂、李七庄断裂所切割形成的局部断块上,地层破碎裂隙发育,构造较复杂,水循环交替较快。通过水文地质、钻探、示踪试验等多种手段方法分析:该区地下热流体水流方向为由西沿北北东方向向东北运移,储水地层渗透系数大约为 18 m/d 左右。

4 结论

地热对井回灌开采是一个非常复杂的过程,干扰因素较多,因此回灌研究的内容十分丰富,示踪试验是回灌研究中最重要、最直观的工作方法。示踪剂的种类很多,有些同位素由于热储岩层中不含有此类物质而更易于检出、检出精度较高等优点广泛应用于油田示踪回灌试验中,在地热开发、回灌开采地热中目前尚处于初步试验、探索阶段。但同位素示踪技术已在天津地热回灌研究中得到了较好结果,对分析回灌水运移方向、速率等规律提供了大量的原始数据,为今后进一步深入研究热储层在回灌前后压力场、温度场、水化学场的变化特征,进而建立回灌数学模型、完善回灌开采的科学理论提供了基本依据。

参考文献:

[1]刘久荣. 地热回灌的发展现状[J]. 水文地质工程地质, 2003, (3): 100-105.

- [2]Axelsson G, Flovenz O, Hjartarson A, et al. Thermal system in N-Iceland[A]. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000[C]. Kyushu-Tohoku, Japan: 2000, 3 027-3 032.
- [3]Laplace P, Jaudin A, Despian, et al. The French geothermal experience review and perspectives [A]. proceedings of the World Geothermal congress 2000[C]. Kyushu-Tohoku, Japan:2000, 283-295.
- [4]Thain I, Dunstall M. 1995-2000 update report on the existing and planned use of geothermal energy for electricity generation and direct use in New Zealand[A]. Proceedings of the world geothermal Congress 2000 [C]. Kyushu-Tohoku, Japan:2000, 217-228.
- [5]Cappetti G G, Passaleva, Sabatelli F. Italy country update report 1995-1999[A]. Proceedings of the world geothermal Congress 2000 [C]. Kyushu-Tohoku, Japan:2000, 108-116.
- [6]Fuchinp H. Status of geothermal power generation in Japan[A] Pro ceedings of the world geothermal Congress 2000 [C]. Kyushu-Tohoku, Japan: 2000, 193-198.
- [7]王东升, 徐乃安. 中国同位素水文地质学之进展[M]. 天津:天津大学出版社, 1993, 3-7.
- [8]王作修. 天津地热资源开发概况及问题[A]. 任湘, 唐宁华, 刘时彬, 等. 第三次全国地热学术会议论文集 [C]. 北京:北京科学技术出版社, 1991, 166-171.
- [9]姜文达. 放射性同位素试综注水剖面测井[M]. 北京:石油工业出版社, 1997, 33-39.

Isotopic Trace Technique in Geothermal Pair Recharging Well System in Tianjin

SUN Bao cheng, ZHENG Mei xiang, LIN Li, ZHAO Su min

(Tianjin Geothermal Prospect development Academy, Tianjin 300250)

Abstract: In order to obtain the recharged water moving law in the geothermal pair recharge exploitation well system and the geothermal storage parameters, the authors selected two sets of the wells in the Middle Proterozoic Wumishan formation to inject radiometric isotopic elements ^{35}S ($T_{1/2} = 87$ days) and ^{125}I ($T_{1/2} = 60$ days) to do the trace experiment. And the peak values are inspected after 130

days and 51 days separately. The infiltration parameters calculated based on the data in the geothermal aquifer, as well as the thermal conductivity. The parameters are well coincided with the result traditional pumping test calculations. The migration orientation of injected trace elements in the aquifer is also identified with the observed result of pumping test, and it is more direct, imaginal and precise. Thus the isotope trace technique for further profound investigation may provide with great amount of information such as geothermal aquifers of pressure field, temperature field and hydro-chemical field of geothermal aquifers and its change characters before and after the recharge. And the isotopic trace dement measurement may provide with technique service for geothermal circulate development and exploitation both for Tianjin and for North China.

Key words : geothermal resources , recharge and exploitation , isotopic dements , trace measurement .

可能由金刚石组成的行星

据《Nature》的 Philip Ball 报道,太空中围绕其它恒星旋转的行星可能部分由纯金刚石组成。到目前为止,在银河外星系发现的 100 个行星中可能是由富含碳的气体 and 尘埃浓缩而成。这将形成一个由大量坚硬的碳化合物组成的世界,如碳化硅,就是工业上常用的金刚砂。这些行星可能有一个几乎是纯碳组成的外壳,它们最外层的壳可能是由石墨组成,但随着深度增加,高压会把石墨变成更紧密的形式——金刚石。另外,碳在这些行星的表面可以形成碳氢化合物,像柔软被子一样覆盖其上,或形成液体的湖和海,如甲烷和沼气。最近,由欧洲太空局的 Huygens 号太空飞船拍摄的木星卫星 Titan 的表面图像显示,在那里的冰、岩石和铁的固体表面上可能存在这样的河流或湖泊。

Kuchner 和 Seager 考虑了华盛顿大学的宇宙化学家 Katharina Lodders 的建议,在碳质行星的可能性研究中得到灵感。他们提出木星富含甲烷、沼气的大气圈是该行星在围绕一个原始的碳核浓缩的证据。

通常认为我们太阳系的行星就像地球的一样都有个铁镍核,外层是岩石。这些来自早期围绕太阳的气体、灰尘或星际物质的凝聚,当它们形成后,就开始冷却下来。但是,Lodders 认为这些富碳的物质也可以聚集并围绕太阳形成一个“焦油圈”(tar line)。来自外部星云的富碳灰尘颗粒可以向内部旋转,并加入到焦油圈中。在早期的太阳星云中存在大量的含碳物质,其中的一些还存留在太阳系中,如碳质的球粒陨石偶尔会降落到地球上。Kuchner 和 Seager 决定对 Lodders 观点进行考察,查明是否在其他星系中的整个行星可以围绕着焦油圈形成。他们进行了计算,发现和具有富碳核部的巨大气体行星形成对比的是,一些碳质小行星反而更像地球,它们是固体,比木星小,并且可能有个薄层甲烷或一氧化碳大气圈。这种大气圈中形成的雨将在星球表面形成焦油海。这些行星的核部可能由硅碳化物或钛碳化物组成,但是一些研究者们对一个厚石墨层能在其顶部形成提出争议,并且认为在几千米的深处这些物质也不可能转化成金刚石。

鉴于陆地生命的关键元素是碳,Kuchner 和 Seager 提出有生命,甚至是智能生命可能存在于地球大小的碳质行星上。无论这些生命长像如何,在他们那么富有石油的世界里,决不会因为碳质燃料这样的一点小事就卷入战争。