岩土工程

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

曾梅香[1],阮传侠[1],赵越波[2],田光辉[1]
(1. 天津地热勘查开发设计院,天津 300250; 2. 天津华北地质勘探局,天津 300181)

[摘 要]为探明回灌流体进入热储层后的运移方式和空间,1998～1999年地热井开采期间,天津市王兰庄地热田在包括一眼回灌井、五眼观测井的试验井场首次进行了化学示踪剂(KI)回灌试验;2001～2002年在同一井场又进行了放射性同位素(^{35}S)示踪回灌试验。前后两次连通试验均与传统的水文地质方法如抽水试验结果吻合较好,但在判断热储层渗流场特征、采灌井间的水力联系等方面,放射性同位素示踪连通试验结果具有更直观、明显、量化等特点。

[关键词]化学示踪剂 放射性同位素示踪剂 响应曲线 渗流场特征 天津王兰庄地热田
[中图分类号]P641 [文献标识码]A [文章编号]0495 - 5331(2008)02 - 0105 - 05

天津作为全国开展地热回灌工作最早的城市之一,回灌运行模式、研究方式较多。回灌是地热田管理中最为复杂的一项技术,为探明热储层渗流场特征和注入流体质点运移特征、避免因回灌而引起热储流体的冷却降温即热突破现象,需要进行回灌试验和示踪连通试验来全面监测回灌综合效应[1]。示踪试验在地热回灌研究中并不常见,但自上世纪60年代中期以来,油田井间示踪技术在我国和其它许多国家的油藏开发动态测试中得到了长足的发展,是目前指导老油田开发中后期采油、认识井间潜力、在高含水油田提高采收率、达到稳产增产目的较为成熟和不可或缺的油藏开发工程手段[2]-[5]。

虽然示踪测试技术在地热田勘探开发工作中不如油田普及,但天津市二十多年的地热回灌研究中,曾在开采历史较长、开发规模较大的王兰庄和山岭子地热田内选择了四眼回灌井,先后进行过两次不同示踪剂的回灌试验,其中王兰庄地热田的 HX - 25B井是唯一一眼参与了前后两次连通试验的回灌井。笔者以 HX - 25B井示踪试验为例,通过两次测试数据分析对比,结合传统抽水试验结果,得出了一些认识,整理成文,愿共商榷。

1 地热回灌中的示踪技术

地热回灌中的示踪试验是在回灌井中注入一定剂量的特定示踪剂,使之随回灌流体一起进入目的热储层,在观测井中及时监测示踪剂产出情况,得到样品中产出示踪剂浓度随时间的响应曲线。通过示踪剂产出计算及峰值特征分析,了解回灌流体的运移空间、扩散途径、方向性流动趋势和速度、波及方向和范围等,探明采、灌井之间的连通关系和热储层非均质特征[6]。

由于地热资源的特性和测试方法的局限,用于地热回灌的示踪剂必须经过严格的静态和动态性能评价,应保证示踪材料在热储层中的本底低、样品中产出情况充分可识别、检验分析灵敏度高;在热储温度、压力条件下具足够的化学、生物和热稳定性;溶于水但不被储层岩石吸附;与被跟踪流体流动特征相似、配伍性好;与地层岩石和储层流体不发生化学反应;放射性同位素示踪剂要有合适的半衰期,安全无毒,具有环保和安全性能;价格合理、使用数量适中、现场可操作性强并具经济性[7]。目前在地热回灌中,用作示踪剂的主要有:化学示踪剂、放射性同位素和稳定同位素示踪剂、活性示踪剂、荧光染色示踪剂。

2 示踪试验实施方案设计

一个科学合理的实施方案是试验能否取得预期成果的关键。试验井场水文地质条件、热储层特征、示踪物质在热储流体中的本底情况及试验现场操作条件等,是确定选择合适的示踪材料、注入剂量、试

[收稿日期]2007 - 10 - 30; [修订日期]2007 - 12 - 21。
[基金项目]矿产资源补偿费地热项目(国土房地热任字[1997]001)资助。
[第一作者简介]曾梅香(1965—),女,1988年毕业于成都地质大学,获学士学位,高级工程师,现主要从事水文地质、工程地质钻探及热储钻探工程研究工作。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

验周期及取样制度的综合因素。

示踪剂浓度在观测井中产出情况主要与井场水文地质条件和热储层特征有关。如果在岩溶裂隙介质中热储层没有区域流干扰,回灌流体冷锋面从回灌井井底向四周推进并逐渐扩大,形成一个瓢把朝向开采井的葫芦瓢状区域,最终达到开采井产生热突破,示踪剂锋面掠过的这个总区域与采灌量大小、采灌井距、流体流通渠道的横截面积、热储层性质(厚度、孔隙度、渗透性)等均有关系[8]。在进行示踪试验时由这些综合因素来估算出合理的注入剂量,同时还须保证样品中示踪剂产出浓度要高于(至少 10倍)本底和示踪剂的突破浓度及化验检测时的最低限度值,另外完整的试验周期、合理的取样制度也是示踪试验的重要环节。

3 地热回灌示踪试验实例

3.1 试验井场地质、热储特征

试验井场位于天津市王兰庄地热田沧县隆起之双窑凸起的北部,控制性断裂为走向北西向的海河断裂带及走向北北东向的白塘口西断裂(见图 1),包括一眼回灌井、五眼观测井(见表 1)。回灌井与观测井目的层均为中元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)热储层,热储岩性主要为厚层状白云岩、白云质灰岩,岩溶裂隙比较发育,成井时的抽水试验资料显示,热储条件比较优越①。

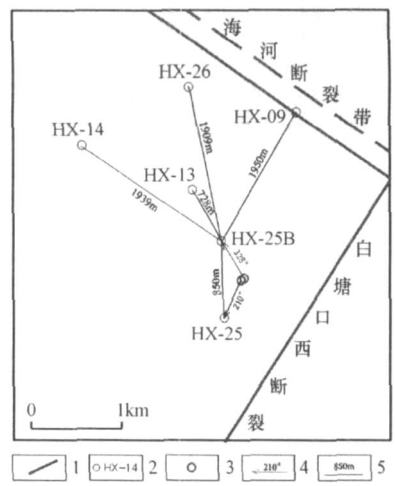

图 1 地热回灌试验井场示意图

1—断裂;2—井底位置及编号;3—斜井井口位置;4—造斜方位角;5—井底距离(m)

在岩溶裂隙热储层中,流体运动通常首先沿主裂隙或岩溶管道窜流,再由强迳流带向周围岩块渗流。若采灌井有管道相通,相对低温的回灌流体进入开采井的时间是比较快的,即很快就会产生开采井的降温现象,出现热突破,这样的采灌系统是不能运行的。因此布置回灌系统时,一般都应避开有管流相通①。而回灌井和开采井是否存在裂隙管道窜流关系,可以通过传统的抽水试验资料来进行分析,更简便和直观的方法是通过示踪连通试验来探明。

表 1 试验井场各地热井地质资料

类别	井号	井深 /m	目的层/取水段厚度 /m	井口水温 /℃	备注
示踪剂注入井	HX - 25B(斜井)	1658(斜深)	Jxw/156	91	回灌井 K = 14.62(m/d) T = 292.5(m^2/d)
	HX - 25(斜井)	1608.69(斜深)	Jxw/66.69	95	
取样观测井	HX - 26	1629	Jxw/92	89	
	HX - 14	1911	Jxw/271	88	开采井
	HX - 13	2748.52	Jxw/248.2	93	
	HX - 09	1673.3	Jxw/71.8	80	

注:表中资料数据引自于《天津市基岩岩溶裂热储层回灌研究》,2001。

3.2 抽水试验及回灌系统运行概况

为确定采、灌系统方案,对井 HX - 25、HX - 25B完井之初均进行了抽水试验,同期观测井也有详细的动态数据。当 HX - 25井以 140m^3/h抽水时:HX - 25B井水位变化幅度为 20～30cm;相距 1909m的 HX - 26井水位呈持续下降状态,最大降深为 6.9m;相距 1939m的 HX - 14井水位也呈持续下降状态(见图 2),HX - 25井与 HX - 26、HX - 14井为典型的管道流曲线特征,即降深与时间(Δ_s～$\sqrt{t}$)呈直线关系,有岩溶裂隙直接连通,所以 HX - 25井是不可作为回灌井之用的。

HX - 25B井抽水时,观测井 HX - 25、HX - 26、HX - 14、HX - 09水位上下波动范围很小在 30cm以内,其中 HX - 14井的波动幅度要略大于其它三眼井。HX - 25B井的抽水试验曲线表现为双重孔隙介质类型,由此可判断 HX - 25B井与井场其它各地热井之间不存在直接的水流通道,适宜作回灌井之用。

① 曾梅香,张百鸣,等.天津市基岩岩溶裂隙热储层回灌研究.天津地热勘查开发设计院,2001,15 - 19,21 - 63.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

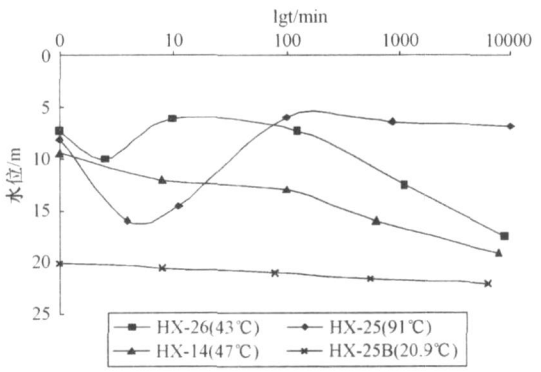

图 2　HX - 25抽水试验及观测井降深曲线
注:数据来源于天津地热勘查开发设计院, 1997。

由回灌井 HX - 25B与开采井 HX - 25组成的采、灌系统从 1996年开始持续运行,状况良好,其回灌水源是经过板换后的原始地热流体,水源平均温度为 40～60℃,年回灌率均在 90%以上。由 10多年连续动态监测数据可知,周边几眼开采井的单位涌水量、井口流温多年来基本稳定。

3.3　化学示踪剂回灌试验

3.3.1　化学示踪剂的选择

较常用的化学示踪剂是卤化物,如碘化物和溴化物等。一般地热流体中均含有 [I^-]、[Br^-](通常在 0.01～1.0 mg/l),为提高流体中示踪离子的浓度达到出现明显峰值的目的,通常注入的剂量很大。化学示踪剂注入后对储层流体比较安全,不会造成污染损害影响其利用,因此一般在初期探索中使用,天津市王兰庄地热田的首次地热示踪连通试验就选择了碘化钾 (KI)作为示踪剂。

3.3.2　化学示踪试验过程

1998～1999年对井运行期间,在回灌井 HX - 25B中注入由原始地热流体稀释后的 KI溶液 20kg作示踪剂,由 HX - 25B井井口混入回灌水源中一同注入储层,系统采用常压、泵管进水式自然回灌方式,灌量约 100m^3/h,水源温度 50℃左右,注入示踪剂后在观测井中 1次/24h采集地热流体 5l样品送检,试验周期 80天,共取得分析数据 300余组,绘制成曲线图 3。

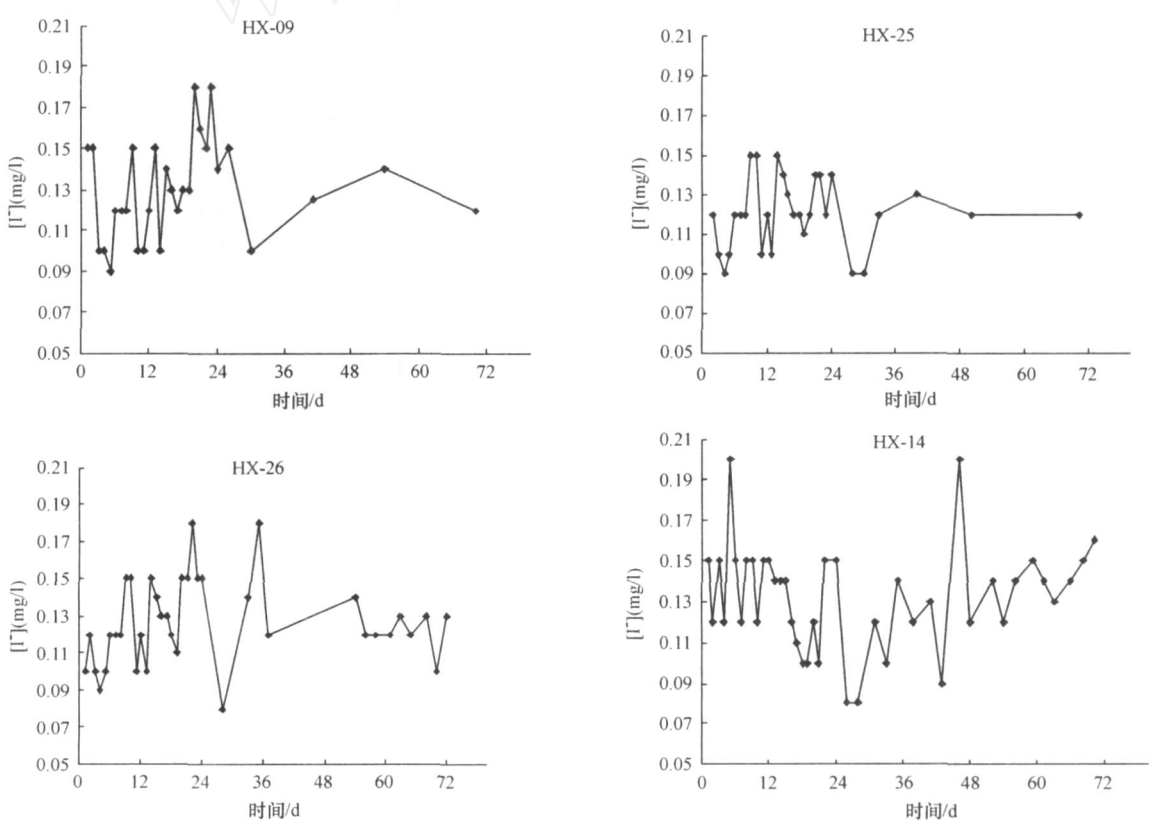

图 3　观测井示踪剂 [I^-]响应曲线
注:天津市地质矿产测试中心分析, 1999。

3.3.3　化学示踪试验结果讨论

由图 3可看出 KI注入后各观测井的 [I^-]基本在 0.08～0.2mg/l之间波动,与其原始浓度 (HX - 25: 0.15mg/l; HX - 14: 0.12mg/l; HX - 26: 0.11mg/l; HX - 09: 0.11mg/l)基本相近,没有观测到较为明显的变化。由于地热流体中普遍含有卤族离子,化学示踪剂试验一般都存在本底干扰问题。相对较大的热储流体而言,示踪剂是扩散到回灌井井底一个

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

较大的储层空间,如果试验井场内采、灌井之间热储层连通性较差[9],薄层泥岩隔水层和微小断裂的阻水作用也将阻碍回灌流体运移到开采区域,所以示踪离子并没有在开采井中大量增加。不过从图 3中可以发现 HX - 14井的 [I⁻]产出浓度为 0.12～0.21mg/l,比其它几眼观测井的 [I⁻]变化幅度相对要大,而且相对其原始浓度 (0.12mg/l)也要高出许多,这种微弱的变化特征也显示出试验井场各地热井之间的水力联系:回灌井 HX - 25B与开采井 HX - 14有微弱水力联系,与其它几眼观测井的水力联系不明显,这与抽水试验得出的结论一致。

3.4 放射性同位素示踪剂回灌试验

3.4.1 示踪剂的选择

放射性同位素示踪剂不受任何化学分解作用的影响,它们按一定的方式、时间衰变,种类多,探测和分析相对简单,无本底分析干扰,只需很小的浓度和剂量即可满足检测要求,分析灵敏度高,用量少,现场注入方便,同时还可实现分层注入跟踪不同层位流体动态状况,可以说在某些方面,放射性同位素示踪剂是地热回灌研究中的最佳示踪材料。

虽然放射性同位素会在一定时间内自行衰变消亡,但其核素对具体操作的试验人员存在一定的伤害隐患,因此在试剂和样品处理、运输等方面的要求十分严格,具体注入时均要经过一系列安全性的评估和保障措施的审核,注入量和采出浓度均应低于国家标准《辐射防护规定》(GB - 8703)的相关要求。

由于化学示踪连通试验结果不明显,HX - 25B井第二次连通试验借鉴了油田井间示踪测试技术,选用放射性同位素 ^{35}S ($T_{1/2}$ = 87天)作示踪剂,检测灵敏度约为 0.5Bq。

3.4.2 试验过程

此次试验在 2001～2002年同一井场进行,考虑到井群位于居民区,为不影响供暖生产和市民生活热水使用,选用对人体和环境无毒害、半衰期短效的 ^{35}S,在回灌井 HX - 25B井口注入 350mCi(约 1.3 $\times10^{10}$Bq)随回灌水源进入储层,仍为常压、泵管自然回灌,灌量约 100m^3/h,水源温度约 50℃,在周围四眼开采井 HX - 25、HX - 14、HX - 26、HX - 13中定期取样 (5l水样 + 1ml稳定剂)送检。试验周期为 180天,共获得有效数据 340个。分析结果显示仅 HX - 14井检测到了示踪剂成份 (见图 4),其它观测井中均未能检测出示踪剂。

3.4.3 试验结果讨论

从图 4可看出:观测井 HX - 14在注入 ^{35}S后第 53天首次检出示踪剂,并在 86天出现一个相对高值,大约在 126天后示踪剂大量检出,至 130天达到最高峰值 (1.229Bq/l),150天后示踪剂则骤然减少,到 170天后完全消失,显示出一个较为明显、完整的试验周期。将这次试验结果反映出来的相关地质信息与通过传统水文地质方法获得的资料进行对比分析可知:

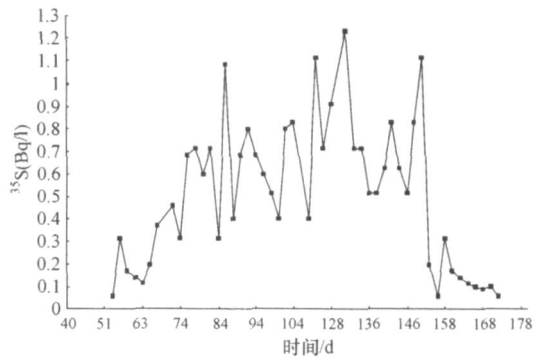

图 4 观测井 HX - 14井 ^{35}S响应曲线

注:国家同位素工程技术研究中心工业应用实验室测试,2001。

1)此次试验只在 HX - 14井中检测出示踪剂成份,说明两次示踪试验与抽水试验均得出了相同的结论即 HX - 25B只与 HX - 14有水力联系,两种方法共同证实在该试验井场中具有这样的渗流场特征:热储层主要受北西向海河断裂带影响,地热井之间的连通渠道以北西向的裂隙为主,回灌流体主体的流向是沿主裂隙向北西方向运移的,注入的示踪剂是沿着这条主要裂隙通道运移到 HX - 14井底。

2) 试验结果显示仅仅在 HX - 14井中检测到了稍高于本底的值,井中检出的示踪剂产出浓度最大只有 1.229Bq/l,不到总注入量 (1.3 $\times10^{10}$Bq)的十亿分之一,说明回灌流体沿着断裂带补给到了其它区域,流入的是一个巨大的热储空间,基本上没有对该区的热储流体产生影响,只有极少一部分示踪剂到达了 HX - 14井周围并被检测到,由此分析在该试验井场,回灌井 HX - 25B与其它开采井之间并不存在裂隙管流通道,否则示踪剂会在短时间内大量流入并很快达到较高值。

3) 到达时间为 130天可说明:在一个供暖期内 (约 135天),回灌井 HX - 25B注入的低温流体并不会使开采井的流体温度出现下降并产生热突破。事实上历年动态观测资料也表明:HX - 14井的井口出水温度多年来基本稳定,没有出现降温现象。

4) 以示踪剂 ^{35}S峰值出现时间为 130天计算,回灌流体从 HX - 25B井运移到相距 1939m的 HX - 14井速率约为 14.92m/d,这一流速是在不考虑热储层性质和流体物理性质等因素影响的情况下,回灌流体从回灌井井底流向开采井的"概化"速度,

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其数值应大于热储层的渗透系数(水力坡度 J为 1时的渗流速度)。HX - 25B井通过抽水试验所求得的渗透系数(K)为 14.62m/d(见表 1)。在该试验井场,注入同位素示踪剂的回灌流体在储层中的"概化"流速与热储层的渗透系数相差不大,二者吻合较好。

由此可见,在判断回灌流体注入热储层后的运移方向、速率等方面,放射性同位素示踪连通试验与抽水试验结果能较好的吻合起来,说明放射性同位素示踪技术运用到地热回灌中,对分析回灌流体运移途径、采灌井之间的渗流场特征均有比较理想的结果[10],且具有更直观、量化、形象等优点。当然放射性同位素示踪剂所需测试仪器复杂,检测设备昂贵,材料成本高,出于安全角度考虑,试验方案必须经过严格审核、取得合法批准后方可进行,尽量使用无化学毒性试剂。

4　结论

示踪技术这种利用某种物质在热储层中的传输,来获取储层方向性非均质特征和回灌流体运移规律的实时跟踪手段和研究方法,已在地热回灌研究中有了初步探索。通过示踪剂试验所获取的资料能了解多种地质信息,如分析热储层渗流场特征、探索回灌流体质点运移特点、采灌井之间的水力联系、预测采灌井之间热突破出现的可能性及时间等,同时也可以采用示踪剂试验并结合热储地质条件分析、抽水试验等方法,来判断采、灌井间是否存在裂隙管道窜流关系,变更和调整不宜运行的采灌系统方案,以此来为地热田开发中回灌系统的布置提供帮助,正确指导和优化规划采、灌井的合理布局。

在设计示踪试验方案时应考虑的问题也很多,如:试验井场的地质条件、热储特征、示踪剂的选择、注入剂量、试验周期、取样制度、分析方法等,这些都是决定试验成功与否的关键。化学示踪剂对储层影响较小、安全性较高,但由于本底干扰,注入剂量往往较大,否则会影响到试验结果;放射性同位素示踪剂具有易于检出、检出精度较高、试验结果较为明显等诸多优势。目前石油部门的井间示踪监测已较为广泛和普及,而在地热回灌研究中尚处于探索阶段,天津地热回灌工作中已有了初步尝试。相信不久的将来,在各界共同努力下,随着地热回灌力度的不断加大,这种技术方法在回灌研究中将会有更为广泛的运用。

[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] 张培信. 油田井间示踪测试技术进展[J]. 国外测井技术, 2005, (6).

[3] 程庆甫,胡景伍,赵　强,等. 井间示踪技术在油水井监测中的应用[J]. 油气井测试, 2003, (6).

[4] 郭宝玺,王秀琴,王喜梅. 井间示踪监测确定水驱油藏剩余油饱和度技术应用[J]. 测井技术, 2002, (3).

[5] 荣　娜. 井间同位素示踪监测技术在胜坨油田中的应用[J]. 西部探矿工程, 2005, (11).

[6] 张远东,魏加华. 冰岛 Laugaland地热田示踪试验与回灌温度模拟[J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, (6).

[7] 朱家玲,等. 地热能开发与应用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006. 52 - 57.

[8] Axelsson et al 冰岛低温热田回灌试验[M]. Proceedings of the World Geothermal Congress 1995 Florence Italy May, 1995, 1991 - 1996.

[9] 王　坤,朱家玲. 天津基岩热储对井系统回灌与示踪剂试验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24 (2): 162 - 166.

[10] 孙宝成,曾梅香,林　黎,等. 天津地热对井回灌系统中的同位素示踪技术[J]. 地质调查与研究, 2005, 28(3): 187 - 191.

CONNECT TEST BETWEEN KARST CRANNY RESERVOIR PUMPING WELL AND INJECTION WELL

ZENG Mei - xiang[1], RUAN Chuan - xia[1], ZHAO Yue - bo[2], TIAN Guang - hui[1]

(1. *Tianjin Institute of Geothermal Exploitation and Development Designing, Tianjin* 300250;
2. *North China Bureau of Geological Exploration, Tianjin* 300181)

Abstract: In order to ascertain motion patterns and space of injection fluid, the first chemical tracer (KI) test was done during 1998 and 1999 in the Wanglanzhuang geothermal field of Tianjin, including one injection well and five observation wells. Another injection test of radioactive isotope 35S was done in the same test field from 2001 to 2002. The results of two tracer tests have the better accord with the traditional hydro - geological methods, for example pumping test. The test result of radioactive isotope tracer injection not only can judge the seepage field characteristics and the hydraulic interaction but also has the directly perceived, obvious and quantitative advantages.

Key words: chemical tracer, radioactive isotope tracer, response curve, seepage field characteristics, Wanglanzhuang geothermal field, Tianjin

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net