

孙小龙、刘耀炜、马玉川等, 2013, 鲁豫交界地区深井水位持续大幅度下降原因分析, 中国地震, 29(1), 132 ~ 141。

• 流体 •

## 鲁豫交界地区深井水位持续大幅度下降原因分析

孙小龙<sup>1,2)</sup> 刘耀炜<sup>2)</sup> 马玉川<sup>3)</sup> 晏锐<sup>3)</sup>

1) 中国地质大学(北京), 北京市海淀区学院路 29 号 100083

2) 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京市海淀区西三旗安宁庄路 1 号 100085

3) 中国地震台网中心, 北京 100045

**摘要** 鲁豫交界地区豫 01、11 井和鲁 27 井等 3 口地震观测深井的水位于 2006 年后出现了准同步的异常下降变化, 下降幅度 3 ~ 12m 不等。经调查落实, 发现该地区近年来地热开采活动日益增强, 开采量逐年增大, 并且开采层与异常井水位观测层同属于奥陶系热储层。为此, 本文依据聊城-兰考断裂带附近区域的水文地质构造特征, 建立了三维地下水流动模型, 基于周边地热开采量数据和相关含水层参数, 运用有限差分方法计算了地热开采所引起的区域水位降落漏斗, 并分析了水位下降异常的时间演化和空间分布特征。结果显示, 聊城-兰考断裂带附近区域自 1995 年开始地热开采活动以来, 其逐年增加的地热开采量与地震观测井水位的下降幅度之间存在较好的对应关系, 分析认为鲁豫交界地区 3 口深井水位的准同步异常下降与周边地热开采活动有关。

**关键词:** 聊城-兰考断裂 水位下降 地热开采 数值模拟

[文章编号] 1001-4683 (2013) 01-0132-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

多年的观测实践及研究表明, 中强地震发生前震中区部分观测井会出现明显的水位异常变化(敬少群等, 2008; 陆明勇等, 2005)。郑治真等(1984)曾采用 Kalman 滤波方法, 处理了京津唐地区 17 口深水井 1971 ~ 1981 年间的观测资料, 结果表明, 1976 年 7 月 28 日的唐山大地震前, 位于大震破裂面西南端的天津地区 6 口井水位存在 2 ~ 3 年的异常下降。这种震前出现的水位异常变化与地震孕育过程中的构造作用和岩体变形密切相关, 大地震发生前, 震源区岩石变形会比以前更加剧烈, 当剧烈的变形传达到地表时, 可使地表附近的含水地层或隔水地层发生变形, 从而引起地下水在重力场中的重新分布, 进而引起井泉点水位的

[收稿日期] 2012-09-14; [修定日期] 2012-12-29

[项目类别] “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK19B02-04)及中国地震局青年震情跟踪小组共同资助

[作者简介] 孙小龙, 男, 1981 年生, 助理研究员, 主要从事地震地下流体研究及地震预报研究。

E-mail: xlsun04@163.com

变化(郭增建,1964;郭增建等,1974)。因此,断裂带或断裂带附近区域的观测井水位的某些动态变化特征可能是构造变形乃至地震事件的敏感信号(Roeloffs et al,1989;Rudnicki et al,1996)。

但是,并非所有的地下水位异常变化都与构造变形有关,地下水观测井的水位也常常受到降雨、河流、地下水开采等水文因素的干扰(黄辅琼等,2005;王旭升等,2010)。近年来,随着中国大陆地区(尤其是华北地区)经济建设和城市化进程的加快,地下水超采现象日益严重,开采层位也越来越深。地下水开采引起的区域地下水位大幅度下降,不可避免地影响了地震地下水观测井水位的动态变化(张素欣等,2007;杨明波等,2009)。因此,地下水位的异常变化既可能是区域构造活动作用的结果,也可能是水文因素的干扰所致,如何有效地识别水位异常的形成原因,是当前利用地下流体资料进行地震预测的关键科学问题之一。

山东菏泽鲁27井、河南范县豫01井和兰考豫11井等3口地下水观测井水位于2006年前后出现了准同步的持续下降(图1),截至2011年底,下降幅度分别达12m、7m和3m左右。此3口观测井地处华北拗陷和鲁西隆起交汇部位的鲁豫交界地区,纵贯南北的聊城—兰考断裂带是区内一条主要控制活动断裂带,在其附近曾多次发生5级以上中强地震,如菏泽1937年8月1日7级地震、1948年5月29日5.5级地震和1983年11月7日5.9级地震等,均造成了人员伤亡和经济损失。王华等(2009)的研究表明,位于聊城—兰考断裂带附近区域的地热开发导致了聊古1井流体测项的动态异常,尤其是冬季供暖期的地热开采,对地下水位观测产生了严重干扰。那么,鲁豫交界地区鲁27、豫01、11等3口观测井水位的异常下降究竟与区域构造活动有关?还是与该区域周边的地热开采有关呢?本研究小组对此进行了现场落实与深入分析。

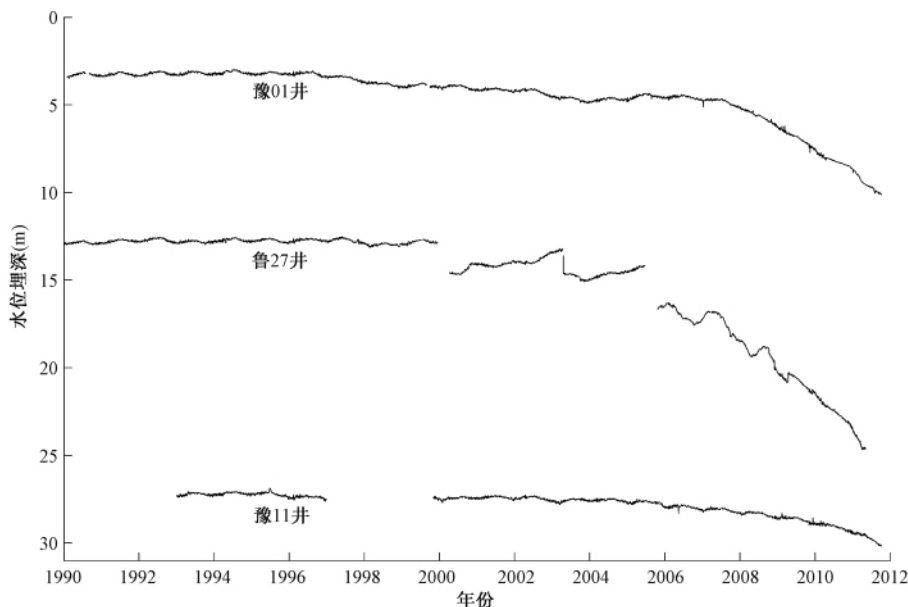


图1 鲁豫交界地区3口深井水位观测曲线(1990~2012年)

## 1 异常井构造环境与深井水位异常特征

山东菏泽鲁 27 井、河南豫 01 井、11 井均为石油勘探探井,分别位于聊城—兰考断裂带两侧(图 2)。其中,鲁 27 井深 2000m,观测层段为 1138 ~ 2000m,为寒武奥陶系灰岩岩溶裂隙承压水;豫 01 井深 2267.03m,观测层段为 1030 ~ 1977m,系奥陶系灰岩岩溶裂隙承压水;豫 11 井深 3138.37m,观测层段为 2908 ~ 3138m,系寒武系鲕状灰岩、泥质灰岩岩溶裂隙承压水。

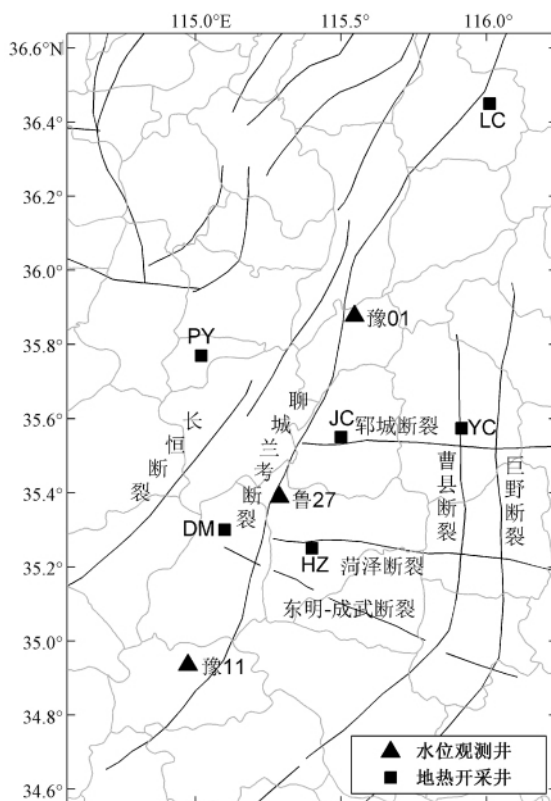


图 2 鲁豫交界地区 3 口深井空间分布及构造环境

聊城—兰考断裂带是华北断块和鲁西断块的分界断层,南起河南兰考,北至山东禹城,全长约 300km,正断层,走向  $NE20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ,倾向 NW,倾角  $60^{\circ}$  左右,垂直断距大于 1000m。断裂从中生代以来构造活动剧烈,伴有中、基性岩浆岩侵入,热液活动强烈,由于该断裂带两侧均发育有隔热较好的盖层,从而在该断裂带附近区域形成了一定规模的地热田,如聊城西部、鄄城、菏泽凸起等地热田,地热田内隐伏断裂构造十分发育,且多为张性正断层(如菏泽断裂、曹县断裂、巨野断裂等)。这些断裂均具有较好的导水性,不仅沟通了深部热源的上涌,而且也是地下水深循环的主要通道(王福花等,2008)。地热田热储层主要为奥陶系灰岩和寒武系灰岩岩溶裂隙层(马振民等,1999;郭晓丽等,2008)。

现场调查发现,聊城—兰考断裂带附近区域存在大量的地热开采井,抽取的地下水主要用于餐饮娱乐、温泉洗浴及居民楼供暖等,开采点主要集中在山东聊城(LC)、鄄城(JC)、

郓城(YC)、菏泽(HZ)和东明(DM)及河南濮阳(PY)等地区,开采层位集中在地表以下1000~2000m附近,各开采点空间分布如图2所示。图3为豫01井观测水位与周边地热开采点抽水量对比图,从对比图中可以看出,该井水位的动态变化与周边地热开采量之间存在一定的相关性。自1995年出现地热开采活动以来,该井水位出现了缓慢的下降变化;2006年后开采量剧增,水位的下降速率也突然增大。由此可见,鲁豫交界地区水位的下降异常可能与周边地热开采活动有关,那么,地热开采引起的区域水位下降在空间分布和下降幅度上是否与豫01、11和鲁27井水位的变化相吻合呢?需要做进一步的定量分析。

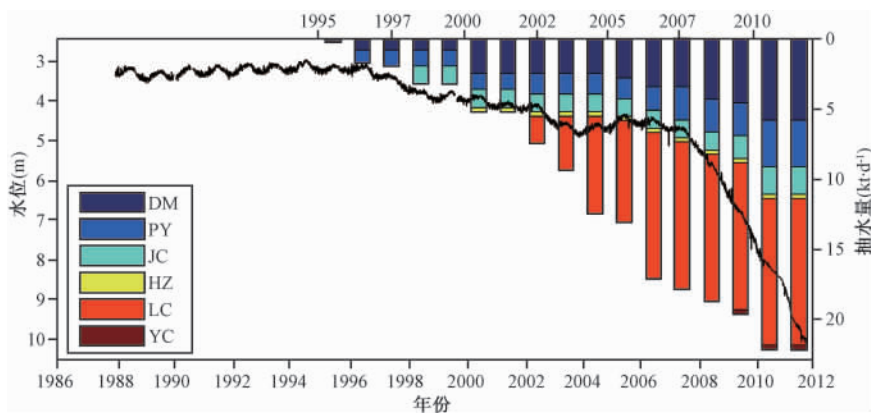


图3 豫01井水位与周边抽水量对比图

## 2 三维地下水流动模型

鲁豫交界地区地热储层多为奥陶系灰岩含水层。图4所示为山东菏泽及其附近区域地层分布示意图(王福花等,2008),地热田盖层主要为第四系(Q)粉砂质黏土和新近系(N)黏土岩、泥岩互层组成,总厚度达1200m左右,热导率低,是良好的隔水层和不透水层,既防止了浅层地下水向下渗透,又阻隔着深层的地下水向上垂直运移,为下层热水资源提供了天然的保温层。该区域内的热储层主要由奥陶系(O)灰岩及寒武系(Є)灰岩组成,多为岩溶发育较好的含水层,埋深约750~1600m,沉积厚度多在400~600m之间。热储层基底为泰山群花岗岩片麻岩类(马振民等,1999;王领法等,2002;王奎峰,2009)。

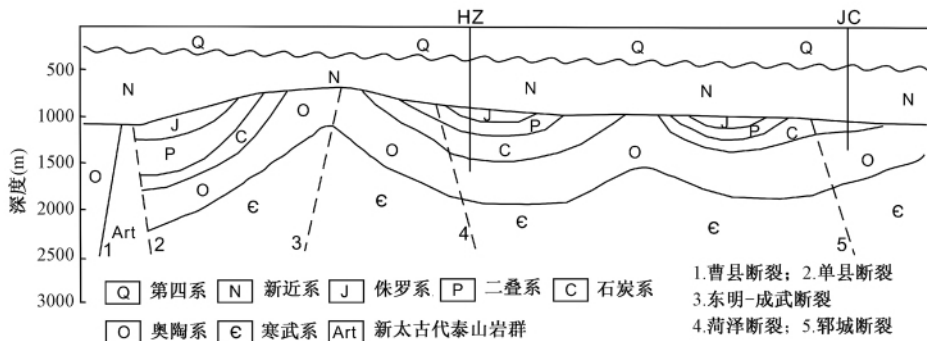


图4 山东菏泽地区及附近区域地层分布示意图

(参考王福花等(2008)山东菏泽地热田“热储概念模型”修改)



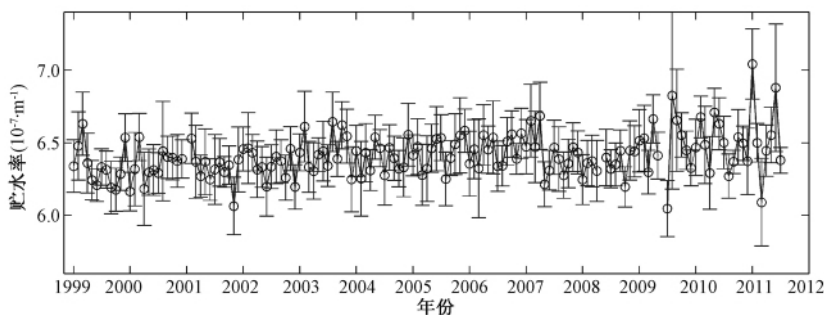


图6 豫01井含水层的贮水率动态变化

总的等效厚度为 500m,其垂向渗透系数为水平向渗透系数的 1/10。通过水位固体潮调和分析法(郑香媛等,1990)求得豫01井、鲁27井和豫11井所处含水层的贮水率  $\mu_s$  约为  $5 \times 10^{-7} \sim 9 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ 。

### 3 数值模拟结果及分析

本文基于以上三维地下水流动模型,并赋予相应的水文参数,计算了鲁豫交界地区地热开采对区域水位的影响程度。图7为地热开采引起的水位降深空间分布图,图7(a)~(c)分别表示自1995年有开采活动以来抽水至2000、2005、2010年底研究区域内的水位降深分布图,计算中水平向渗透系数  $K$  取  $3.5 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,贮水率  $\mu_s$  取  $7 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ 。结合图3所示的抽水时段与抽水量数据,在1995~2000年间,地热开采比较集中的区域主要是DM、PY和JC,并且抽水量较小,所以在研究区引起的水位降落值和影响范围较小。2001~2005年间LC地区出现地热开采活动,且开采量逐年增加,至2005年底,DM与HZ地区漏斗明显增大,LC地区也出现了明显的降落漏斗。2006年后,各开采区地热开采活动明显增强;尤其是LC地区,至2010年底,地热开采引起的水位下降范围几乎遍及整个研究区域,局部地区水位降落值超过20m。

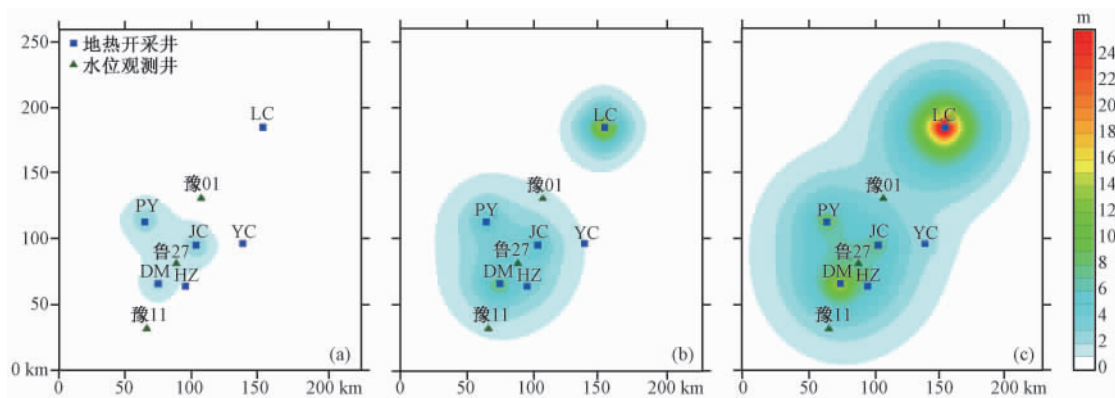


图7 地热开采引起的区域水位降深空间分布图

$$\mu_s = 7 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}, K = 3.5 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(a) 自1995年有开采活动以来抽水至2000年底; (b) 自1995年有开采活动以来抽水至2005年底;

(c) 自1995年有开采活动以来抽水至2010年底

水位降深空间分布模拟结果显示,位于聊城—兰考断裂带附近的豫 01、鲁 27 和豫 11 等 3 口观测井水位均会受到周边地热开采活动的影响。图 8 为 3 口井实测水位降深值与  $K$ 、 $\mu_s$  取不同值时的模拟值对比图。从图 8 可以看出,3 口井水位实测值与模拟值的趋势变化基本吻合,但局部有所差别,这与模型参数的选取有一定关系。具体分析如下:

图 8(a)、8(b) 中,豫 11 井实测水位降深趋势线明显高于模拟值曲线,可能与该井所处构造环境特征有关。图 2 中东明—成武断裂为压性左旋型走滑断裂,具有一定的阻水作用,豫 11 井位于该断裂南侧,而地热开采点多集中在北侧,该断裂的存在一定程度上减弱了其南、北两侧的水力联系,进而减小了断裂北侧地下热水开采对南侧豫 11 井水位的影响。另外,本文模型中忽略了观测层与相邻含水层之间的越流,但一般情况下,如果对某一含水层进行长时间大量的抽水,抽水层与相邻含水层之间必然会发生越流。所以,在忽略越流因素的情况下,会出现模拟降深值大于实际观测值的情况。

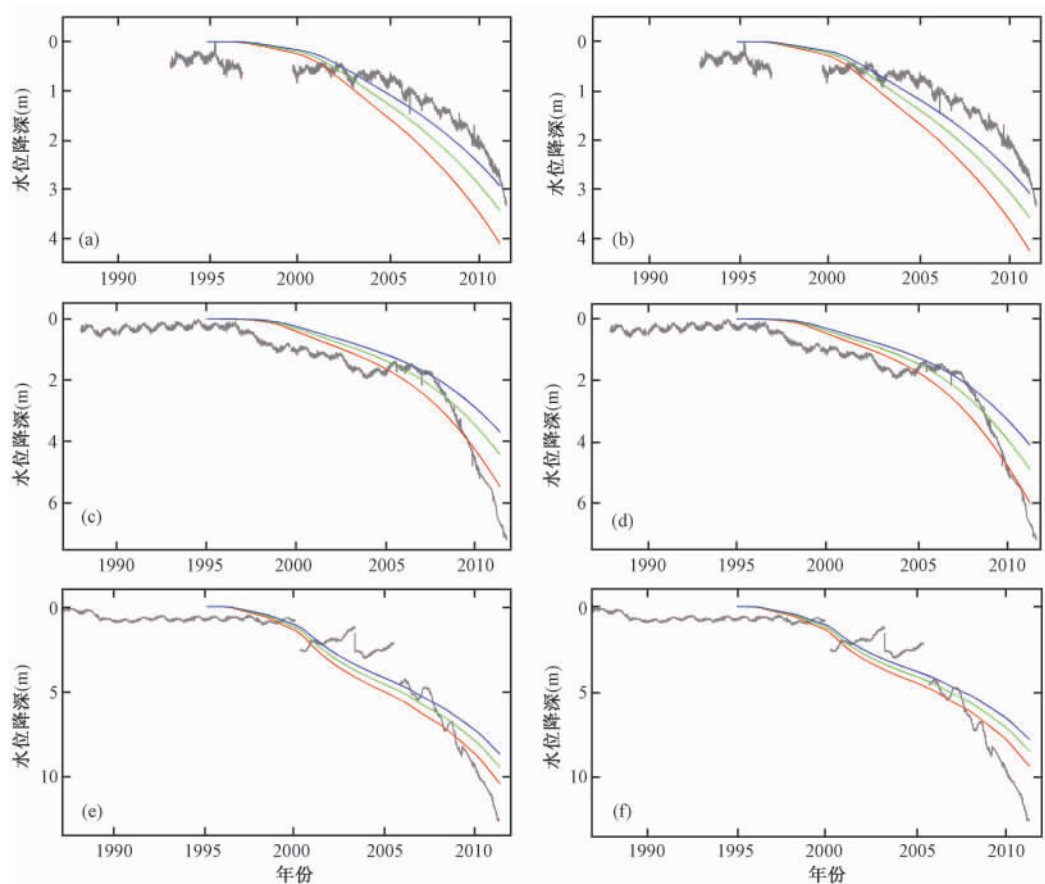


图 8 豫 11、01 井和鲁 27 井水位实测下降值与模拟值对比图

(a)、(b) 豫 11 井; (c)、(d) 豫 01 井; (e)、(f) 鲁 27 井

灰色为实测水位降深曲线; 红、绿和蓝色分别为  $\mu_s$  取  $6 \times 10^{-7}$ 、 $7 \times 10^{-7}$  和  $8 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$  时的模拟曲线;

(a)、(c)、(e) 中  $K$  取  $3 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b)、(d)、(f) 中  $K$  取  $4 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图 8(c) 和图 8(d) 中, 豫 01 井实测水位趋势线与模拟值曲线在 2007 年之前基本吻合, 但 2007 年之后的实测水位下降速率明显高于模拟值, 笔者分析可能与地热开采资料收集不全有一定关系。本文所采用的地热开采数据中, DM、HZ、JC 和 YC 的开采量由东明县地震办公室提供, PY、LC 开采量源自相关文献报道(郭晓丽等, 2008; 王华等, 2009)。2007 年后研究区域内地热开采活动急剧增强, 开采单位包括房地产开发公司、旅游开发公司、宾馆酒店、政府部门以及部分民间组织, 其管理模式也不尽相同, 在提供和收集数据时难免会遗漏部分资料, 因此利用本文所收集到的开采量数据计算得到的模拟结果与实际观测值不完全吻合是可以理解的。

图 8(e) 和图 8(f) 中, 鲁 27 井实测水位降深 2002 ~ 2006 年间高于模拟值是由于观测仪器的“零飘”现象所致, 其校正后的实测水位降深基本和模拟值吻合。与豫 01 井类似, 2007 年后该井实测水位下降速率明显高于模拟值, 也与地热开采数据不完整有关。

从图 7、8 的模拟结果可以看出, 由于地热开采层位的不同, 对不同埋深含水层水位的影响也不尽相同。本研究区域地热开采层主要集中在奥陶系石灰岩层, 其埋深一般为 1000 ~ 2000m, 该层段水位受地热开采活动的影响也最大, 豫 01 井和鲁 27 井水位观测层恰好在此范围内, 而豫 11 井的观测层则在 3000m 左右的寒武系岩层, 所以该井水位受地热开采的影响也较小, 因此其水位降深值明显低于其它两口观测井。另外, 不仅观测井附近地热开采量大小会直接影响到观测井水位的下降幅度, 水位观测井距开采点的远近也会直接影响其水位降深值的大小。相比豫 01、11 井, 鲁 27 井距 DM 开采点和 HZ 开采点较近, 所以该井的水位降深值也明显大于其它两口观测井。

综上所述, 虽然豫 01、11 和鲁 27 等 3 口观测井实测水位降深与模拟值之间存在局部的不吻合, 这主要是三维模型所取参数的理想化和地热开采数据残缺等因素导致的, 但模拟得到的水位下降幅度在数量级上与实测水位是基本吻合的。因此, 可以肯定该 3 口井水位的下降与周边地热开采活动存在必然的联系。

## 4 结论与讨论

针对鲁豫交界地区豫 01、11 井和鲁 27 井水位近年来出现的异常下降, 本文依据该区域地质构造与水文环境特征, 建立了三维地下水流动模型, 模拟计算了区域地热开采引起的水位降深时空变化特征, 得到以下主要结论:

(1) 鲁豫交界地区 3 口深井水位的多年趋势下降, 主要是由周边逐年增强的地热开采活动所引起。从地热开采量和地下水位下降幅度的相关性特征来看, 2006 年之前, 地热开采活动较少, 开采量也较小, 豫 01、11 井和鲁 27 井水位的下降速率均比较缓慢; 而 2006 年之后, 地方政府及相关单位加强了地热资源开发利用强度, 开采点也逐渐增多, 这直接导致了该区域地下水水位的快速下降。

(2) 水位观测井距地热开采区的距离以及开采量的大小直接影响到观测井水位的下降幅度。鲁豫交界地区的地热开采点多集中在人口密集的市区与县城地区, 豫 01、11 井和鲁 27 井中, 鲁 27 井距 DM、HZ 和 JC 开采区最近, 其水位的下降幅度也最大, 至 2011 年底, 已下降近 12m。豫 01 井虽然距 PY、JC 和 LC 等开采点较远, 但由于 LC 开采区开采量较大, 致使该井水位的下降幅度至 2011 年底时也超过了 7m。



近 10 年来,随着区域经济的飞速发展,各地加速地热资源的勘查与开发,给地震地下流体观测带来了严重的影响。仅在华北地区已导致多口观测井先后断流,被迫停止地下流体综合观测(车用太等,2004)。因此,地热开发对地震地下流体观测的影响具有一定的普遍性。聊城-兰考断裂带附近区域地下热水的主要来源为大气降水的垂直入渗经深部循环补给,其次是侧向径流补给和沉积时保留下来的封存水和沉积水(王福花等,2008),而热源主要来自于地壳深部热流的地温传导。这些热水的循环补给是一个缓慢的过程,如果周边地热开采活动持续增加,会直接导致补给与开采之间的失衡而出现局部区域的水位降落漏斗,进而干扰了地下流体的正常动态变化。本文以及其它相关文献(王华等,2009)的研究结果也证明了这一点。

本文研究得出了鲁豫交界地区深井水位的下降主要受周边地热开采影响的初步结论,分析过程中的一些问题仍值得深入探讨。研究区内断裂纵横交错,地层高低起伏,这些复杂的水文地质环境,一定程度上影响了含水层之间的水力联系和地下水流动特征。虽然利用概念化的数学物理模型计算得到的水位降深值与实测值之间存在局部不吻合之处,但据二者的趋势性变化及数量级上的一致性基本可以肯定水位的下降是由地热开采所引起的,这一初步结论可为判定水位异常变化是否与构造活动有关提供科学的参考依据。另外,由于聊城-兰考断裂是上地幔的深大断裂,断裂带附近区域的地热开采必然会引起其断裂破碎带孔隙压力的变化,当然也存在触发局部地区地震发生的可能性(Brodsky et al,2001)。

**致谢:**山东省东明县地震办公室提供了相关地热开采量数据,山东省地震局、河南省地震局、菏泽市地震局、濮阳市地震局和开封市地震局相关工作人员协同本研究小组进行了水位下降异常落实工作,车用太研究员为本项研究提出了建设性意见,在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- 车用太、鱼金子,2004,地下流体典型异常的调查与研究,北京:气象出版社。
- 郭晓丽、李庆朝,2008,聊城市地热资源的形成及开发利用,中国煤炭地质,20(7),35~38。
- 郭增建,1964,地震发生前的地下水位变化,地球物理学报,13(3),223~226。
- 郭增建、秦保燕、冯学才,1974,从震源孕育模式讨论大震前地下水的变化,地球物理学报,17(2),99~105。
- 黄辅琼、白长清、张晶等,2005,八宝山断层的变形行为与降雨及地下水的关系,地震学报,27(6),637~646。
- 敬少群、王佳卫,2008,大震前地下水位异常与应力异常区,地震,21(2),79~86。
- 李庆朝、李贵民,2005,聊城大学地热井成热条件及其开发利用,聊城大学学报,18(2),46~53。
- 卢政峰、张美芝、马晓东,2008,聊城西部地热田地热流体特征及开发利用,山东国土资源,24(6),49~52。
- 陆明勇、牛安福、陈兵等,2005,地下水位短临异常演化特征及其与地震关系的研究,中国地震,21(2),269~279。
- 马振民、何江涛、魏加华,1999,鄄城地下热水的化学特征及形成机理,勘察科学技术,(4),18~21。
- 王福花、侯欣英、孙鹏等,2008,山东菏泽地区地热田地质特征,山东国土资源,24(4),40~43。
- 王华、王伟、李月强等,2009,地热开采对聊古 1 井地下流体动态的影响及其对策,地震地质,31(3),515~525。
- 王奎峰,2009,山东省聊城市东部地热田地热资源特征,中国地质,36(1),194~202。
- 王领法、张尚坤、谢寅骧等,2002,菏泽凸起地下热水资源成矿地质条件研究,菏泽师专学报,24(2),25~35。
- 王旭升、王广才、董建楠,2010,断裂带地下水位的降雨动态模型及异常识别,地震学报,32(5),570~578。
- 薛禹群,1997,地下水动力学,北京:地质出版社。
- 薛禹群、谢春红,2007,地下水数值模拟,北京:科学出版社。
- 杨明波、康跃虎、张庆等,2009,北京地下水位趋势下降动态及地震前兆信息识别,地震学报,31(3),282~289。

张素欣、刘耀炜、陆明勇等,2007,地下水超采区水位长趋势动态分析,地震,27(4),51~58。

郑香媛、刘澜波,1990,深井水位固体潮的调和分析结果,地球物理学报,33(5),556~565。

郑治真、吴大铭,1984,非平稳过程的最优线性滤波在唐山地震前地下水位观测资料中的应用,地球物理学报,27(5),424~438。

Bredehoeft J D, 1967, Response of well-aquifer systems to earth tides, Journal of Geophysical Research, 72(12), 3075~3087.

Brodsky E E, Kanamori H, 2001, Elasto-hydrodynamic lubrication of faults. Journal of Geophysical Research, 106, 16357~16374.

Roeloffs E A, Burford S S, Riley F S, et al, 1989, Hydrologic effects on water level changes associated with Episodic Fault creep near Parkfield, Journal of Geophysical Research, 94(B9), 12387~12402.

Rudnicki J W, Yin J, Roeloffs E A, 1996, Analysis of water level changes induced by fault creep at Parkfield, California, Journal of Geophysical Research, 98(B5), 8143~8152.

## Cause analysis of continuous downward of water level in deep wells in the border area of Shandong and Henan

Sun Xiaolong<sup>1,2)</sup> Liu Yaowei<sup>2)</sup> Ma Yuchuan<sup>3)</sup> Yan Rui<sup>3)</sup>

1) China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** The water levels in deep wells of YU01, YU11 and LU27 have continued to decline almost at the same time since 2006, and the decreases range from 3m to 12m. The three wells are located in the border area of Shandong and Henan. The investigation reveals that there are some pumping wells for geothermal mining, and the mining is gradually increased. We also find that the observation layer of wells with water level decreasing is the same aquifer layer which is pumping now, and the heat reservoir belongs to Ordovician. According to the hydrogeological tectonic characteristics of the area nearby Liaocheng-Lankao fault, we set up a three dimensional groundwater flow model based on the surrounding geothermal data and related aquifer parameters. Water landing funnel caused by geothermal mining was calculated using finite difference method, and the distribution characteristic of drawdown was analyzed. The result shows that the decline of water level was related to the pumping for geothermal mining. In areas nearby Liaocheng-Lankao fault zone, geothermal mining, which has increased year by year since 1995, has a good corresponding relationship to the decline of water level in deep wells.

**Key words:** Liaocheng-Lankao fault    Water level decrease    Geothermal mining  
Numerical simulation