

文章编号: 0253-3782(2007)03-0274-11

山东东营杜邦1井注水诱发 破裂活动分析^{*}

李行船^{1,*} 郭 飚¹⁾ 曲国胜²⁾ 刘启元¹⁾
李顺成¹⁾ 陈九辉¹⁾ 李岩峰²⁾ 谢晓峰²⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

2) 中国北京 100049 中国地震应急搜救中心

摘要 2005年12月3日—2006年5月18日,中国地震局对山东东营杜邦1井(直井)进行了6个月的注水诱发地震监测。对该井1 464~3 034 m,即纵向跨距1 570 m的4个注水层段(沙三中、沙三上顶部、沙三上底部、沙二段)11个注水作业过程进行了完整记录,应用长短项平均和多台比较方法共获得地震事件记录5 090个,最终获得定位事件274个。监测期间记录到的事件信号能量都比较小,没有 $M_L > 0.5$ 的震动信号。从注水开始,事件的数量随时间呈现出不同的变化,在沙三上的中等胶结程度地层中,震动破裂事件最为频繁,破裂事件空间位置随时间从注水中心向外围扩展,在不同的注水层段呈现出不同的方向性:在低渗透储层段,破裂事件的展布趋向与最大水平主压应力方向一致;在中高渗透层段,震动事件更多地沿主渗流通道展布。

关键词 注水诱发地震 地层破裂 地震监测 地震定位

中图分类号: P315.8 **文献标识码:** A

引言

2005年山东省东营市与美国杜邦公司签署了高达20亿美元的钛白粉筹建项目。工厂建成运行后,拟采用十几口井实施工业废水地下排注,排污规模可达1 000~2 000 m³/周期。杜邦1井是实施的第一口注水测试井,施工限压17.2 MPa,设计注水井口压力10.3 MPa。由于该地区所在的青南次级凹陷附近曾发生过由于注水或钻井而诱发地震及地层破裂的事件,并且工区内广泛分布大面积水库(生活水源)、盐场、虾池等,地面条件比较复杂。因而对该地区注水诱发地震活动进行监测,认识该地区注水诱发地震及地层破裂特征,进行注水诱发地震危险性评估显得尤为重要。为此,中国地震局承担了“山东东营杜邦1井注水诱发地震活动监测及分析”项目。对该井4个注水层段(沙三中、沙三上顶部、沙三上底部、沙二段)11个注水周期进行了全程监测,着重对诱发破裂的空间展布、震级等随注水过程的变化进行研究。

* 中美合作项目《山东东营杜邦1井注水诱发地震中长期监测》资助。

2006-09-29 收到初稿, 2007-02-26 决定采用修改稿。

* 通讯作者。e-mail: shipboat@126.com

1 青南次级凹陷及区域地质特征

1.1 青南次级凹陷区域构造地质特征^①

杜邦1井(GPS定位坐标为118.853 41°E, 37.401 73°N)井区地面条件复杂, 自西向东跨越陆地、海滩和浅海, 地势平缓。工区内有广利河、支脉沟等几条河流横贯南部陆地工区, 并广泛分布大面积水库(生活水源)、盐场、虾池等。

从构造位置上讲, 青南次级凹陷位于济阳坳陷内东营凹陷的东部。其东为青东凹陷, 东北为垦东—青坨子凸起, 南临鲁西隆起和广饶凸起。该凹陷呈北断南超的箕状形态, 区内主要发育北西—南北向和北东—东西向两组断裂(图1)。其中, 北西—南北向断裂形成的时代较早、规模较小, 主要切割古生代—中生代地层, 使之形成高低差异的古潜山和沟谷; 北东—东西向断裂形成的时代较晚, 大部分在中生代末的燕山运动以后形成。其规模较大, 控制着新生界沉积。北部青南断裂为一条主控断裂, 中生代后期至早第三纪活动强烈, 落差大; 南部断层活动弱, 落差小, 形成了北陡南缓的箕形断陷湖盆^②。

从地层发育情况来看, 在凸起区普遍缺失下第三系, 上第三系直接覆盖在中生界—太古界之上。凹陷内普遍发育孔店组、沙河街组地层, 次凸起上的地层分布则介于凹陷与凸起之间。地球物理勘探成果表明, 凹陷内部下第三系基本无断层发育。

1.2 区域应力场背景

已有的研究(许忠淮等, 1983, 1989; 董瑞树, 蒋秀琴, 1985; 高建理等, 1987, 1992; 孙叶, 谭成轩, 1995; 宗国洪等, 1999; 李平等, 2001; 谢富仁等, 2003; 陈国光等, 2004)普遍认为, 中国东部及邻近地区现代构造应力场的主体特征表现为近东西向挤压。其中, 中国华北—东北地区的主压应力方向以 NEE—SWW 方向为主导。

注水试验井区所在的胜利油田黄河三角洲区域内($35^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$)80 组单震机制解主压应力(P)轴优势分布方位在 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间, 主张应力(T)轴大体在 $340^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间, 与华北区域构造应力场方向一致。其平均机制解表明, 地震断裂的可能方向为北西向(约 310°)和北东向(约 50°), 以近走滑和走滑运动为主^③。此外, 胜利油田水压致裂裂缝监测资料亦表明^④, 黄河三角洲区域内水力压裂裂缝走向基本在 $\text{NE}70^{\circ} \sim \text{NE}110^{\circ}$ 范围内。

20世纪90年代初, 国家地震局据我国东部油田大量水力压裂地应力资料, 在测量深

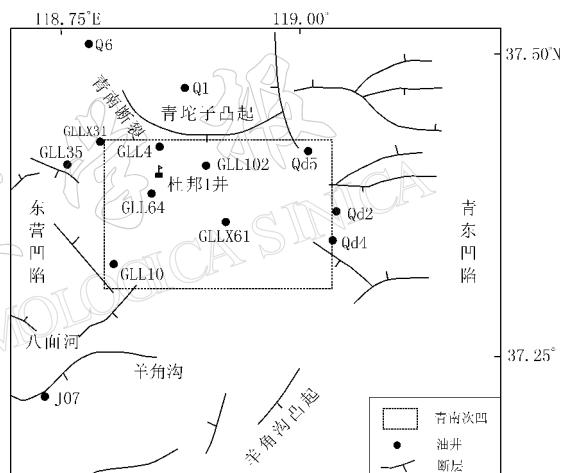


图1 青南次级凹陷区域构造位置

^①, ^② 方国庆, 杨守业, 范代读. 2006. 青南四凹陷沙—沙四上亚段沉积相及有利勘探区带研究. 胜利油田报告.

^③ 胜利油田地震台编. 2005. 黄河三角洲地震地质. 胜利油田报告: 32-37.

^④ 胜利油田采油院编. 2000. 胜利油田水力压裂裂缝监测. 胜利油田报告: 16-23.

度范围内对地应力数据按深度进行线性回归认为, 当井深超过一定深度后, 从渤海湾盆地总体来看, 3个主应力满足 $\sigma_h > \sigma_v > \sigma_s$, 即垂向应力为中间应力, 且该地区断层活动以走滑断层为主, 压裂将出现垂直缝.

总的看来, 受太平洋板块、欧亚板块和印度板块的联合作用, 东营区域应力场主体表现为东西向近水平挤压和南北向水平拉张.

2 监测台站的布设

对于注水层段的选择, 杜邦公司根据地质录井及测井资料, 将沙三中、沙三上、沙二段及东营组地层作为杜邦1井主要注水测试层段. 地震监测项目组根据地面情况及注水测试方案进行了流动台站的部署与调整.

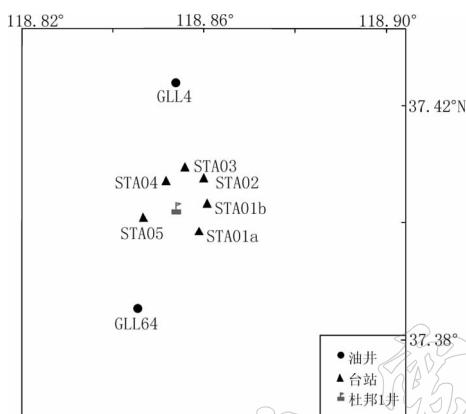


图 2 流动台站分布图

进行台站布设时, 考虑到地表的环境条件及现今应力场背景下可能的裂缝扩展方位及破裂大小, 在地表布设了5个宽频带流动地震台(图2), 并于2005年12月3日开始工作. 地震监测采用了EDAS-24C型流动地震仪, 工作采样率为200 Hz, 动态范围超过120 dB; 检波器采用工作于短周期模式下的FBS-3型宽频带流动地震计, 固有周期为2 s, 记录信号的频带范围优于2 s~50 Hz; 连续地震波形数据通过EDAS-HD-4G型地震数据存储器记录. 整套仪器采用150 W的太阳能浮充电系统供电, 以

保证系统长期不间断观测; 为保证寒冷气候条件下正常工作以及仪器设备的安全, 采用了防冻和防盗措施.

由于工作区内的土质较为松软, 在台站建设时除去了30~50 cm的表层土. 其中距杜邦1井距离最近的STA01a号台与井口距离约为710 m, 而最远的STA03号台距离井口为906 m. 观测期间由于STA01a号台周围施工取土, 致使环境噪音非常大, 不利于微震观测, 故于2006年1月4日变更为STA01b号台(图2).

3 测试井注水作业过程

自2005年12月3日监测台站开始运行, 杜邦1井共有4个注水层段进行了作业. 其中, 在注入排量稳定的情况下沙三中第一次注水测试中出现两次压力突降现象, 沙三上第二次注水测试中出现一次压力突降现象, 沙二段第三次注水测试中出现一次压力突降现象(压力突降前, 注入总量分别为4 150, 5 570, 2 067 m³和6 770 m³), 其它注入过程压力平稳上升直至停泵. 自2006年4月21日—2006年4月26日持续注入循环池内盐水, 排量较低, 无注水参数记录, 注入总量约7 400 m³(表1).

4 监测过程及监测处理结果

4.1 监测过程

2005年12月3日—2006年5月18日, 地震台站进行连续实时监测, 监测周期约为6

表 1 杜邦 1 井注水作业过程

层段名	深度/m	措施	年-月-日	排量 / $m^3 \cdot min^{-1}$	最大注入 压力/MPa	注入总量 / m^3
沙三中	3034~2838	注水	2005-12-04—09	1.1	43	6157
			2005-12-16—17	1.9	34.5	2223
			2005-12-23—24	1.9	37.3	3344
		射孔	2005-12-29			
沙三上底部	2629~2707	注水	2006-01-02—03	1.8	38.2	513
			2006-01-12—18	2.0	39	4884
			2006-02-10—14	1.58	28.7	3981
		射孔	2006-02-21			
沙三上顶部	2547.5~2404	注水	2006-03-02—05	1.9	27.2	7350
			2006-03-21—25	1.9	25.8	2750
			2006-04-01			
		射孔	2006-04-07—10	2.5	15.9	2227
沙二段	1635~1714	注水	2006-04-10—13	2.3	15.8	2480
			2006-04-17—19	2.2	16.3	3216
			2006-04-21—26	2.25	16.7	7400
东营组	1294~1464	射孔	2006-04-29		射孔后没有进行注水试验	

个月。2006 年 1 月 18 日—2006 年 2 月 6 日正值春节, 杜邦 1 井停止注水试验。在此期间对地震仪器进行常规维护, 地震台站停止工作约 19 天。2006 年 4 月份开始, 杜邦公司在监测区域范围内进行大规模挖泥作业, 致使 2006 年 4 月份的数据噪音较大。2006 年 4 月 27 日 STA05 号台的台基被杜邦公司厂区建设施工破坏, 造成 STA05 号台记录失效。由于 2006 年 5 月份以来记录的数据以施工噪音为主, 诱发破裂事件记录被噪音掩盖无法识别。

4.2 监测处理结果

4.2.1 监测到的震动事件

监测期间共记录到连续波形数据约 120×10^9 。由于所记录的数据量极大, 必需采用计算机自动检测方法来拾取震动信号。根据项目任务和观测方式, 采用了长短项平均和多台

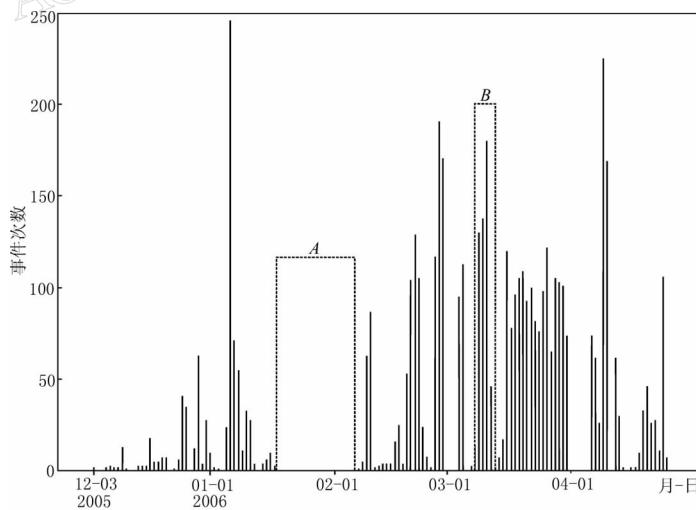


图 3 震动事件随时间分布图

A. 2006 年 1 月 18 日—2 月 6 日, 杜邦 1 井停止注水作业, 地震台站停止工作进行常规维护; B. 2006 年 3 月 8—13 日, 杜邦 1 井实施井下温度计和压力计打捞作业, 地震台站正常运行, 并记录到系列地层破裂事件

比较方法来检测事件。共检测到有效震动信号 5 090 条。图 3 为整个地震台阵监测期间检测的震动事件随时间分布的图象，该图表明，2005 年 12 月份的事件较少；2006 年 1 月中旬事件突然增多；2006 年 1 月 18 日—2 月 6 日仪器维护检修，无记录，见图 3 中虚线(A)所示；2006 年 2 月中旬至 2006 年 4 月初整体事件都较多，表明监测事件随试验的层位和时间而变化。

4.2.2 震动信号的分类

通过识别，触发得到的震动信号可以分为以下 3 类：

- 1) 有清晰的初动，面波不发育，整个波列持续时间较短(约 1 s)。
- 2) 面波比较发育，有时初动不是很清晰，波列持续时间较长(约 2~4 s)。
- 3) 波列持续时间约 2 s，无面波，能量逐渐增强。

第一和第三类信号较少，约占总信号数的 20%；第二类信号约占总信号数的 80%，能量也最强。另外，监测期间还记录到沙三中及沙三上两个注水层段的两次爆破射孔事件（图 4），对沙二段和东营组的两次爆破射孔事件则没有记录到。

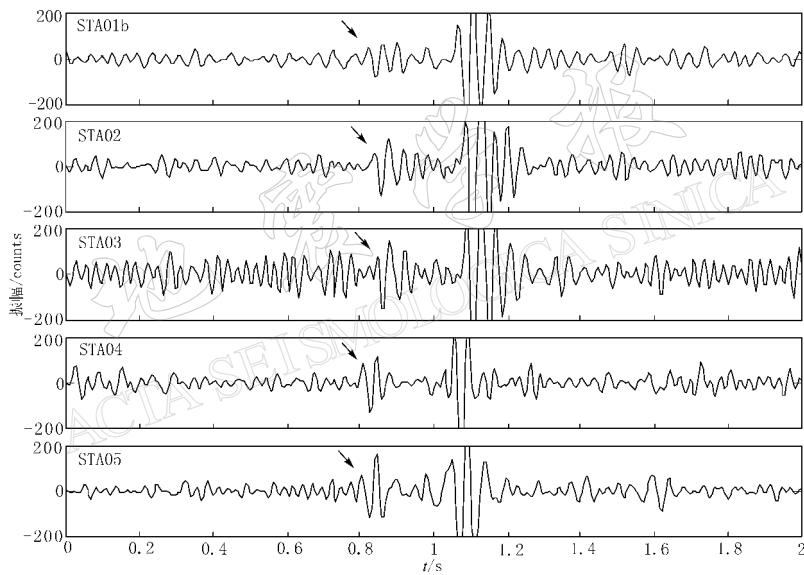


图 4 2006 年 2 月 21 日 1 点 0 分 51 秒射孔事件垂直分量记录图

图中箭头指向射孔信号的初至

通过事件的三分量记录可看出，大部分事件的能量主要在垂直分量，而水平分量的能量很小（图 5）。

4.2.3 事件的震级估算

由于破裂能量较小，故采用信号的持续时间来确定震级。应用 Crosson(1972) 的经验公式

$$\hat{M} = -0.87 + 2.0 \times \lg \tau + 0.0035\Delta \quad (1)$$

进行计算。其中， \hat{M} 表示震级； τ 表示信号持续时间，单位为 s； Δ 表示震中距，单位为 km。

监测期间记录到的信号最长持续时间为 4 s。根据上述公式，信号震级约为 0.3 级。

大部分信号的持续时间小于 3 s, 震级小于 0.1 级.

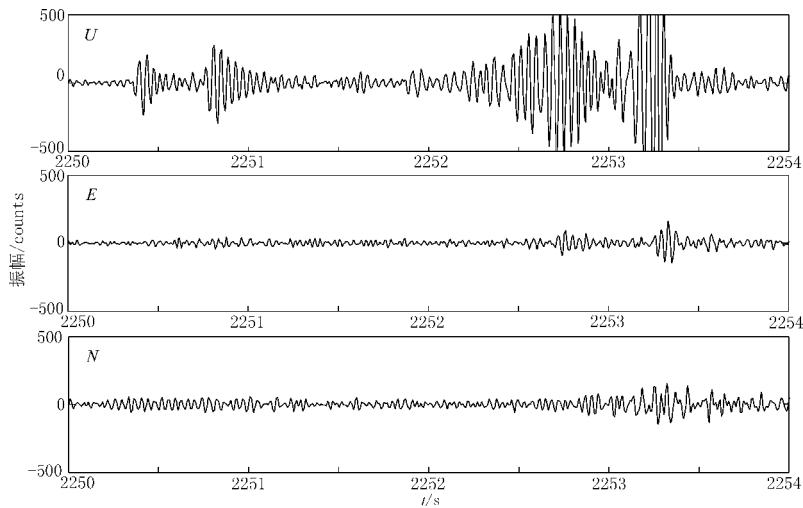


图 5 2006 年 2 月 19 日 22 时 STA01b 台站三分量记录图

4.2.4 事件定位

进行事件定位时, 考虑到野外地震台阵监测的孔径较小(约 2 km), 本文采用网格搜索方法对有 4 台以上记录并有清晰初动的事件进行定位. 网格搜索方法就是在模型内的每一个节点上计算一次目标函数, 其中目标函数最小并满足截断值的节点即为震源位置.

根据项目实际要求, 模型以杜邦 1 井为中心, 水平范围为 3 km×3 km, 深度范围为 0~3 000 m, 搜索步长为 50 m, 目标函数的截断值为 0.01 s. 速度模型采用当地人工地震勘探结果得到的一维连续速度模型, 并根据 2005 年 12 月 29 日 16 点 45 分 56 秒和 2006 年 2 月 21 日 1 点 0 分 51 秒两次射孔的位置和记录到的走时回归校正速度模型.

经过上述处理, 共获得模型范围内的事件 274 个(对模型范围外的事件不做处理). 定位结果显示, 地震事件时序与空间分布呈现一定的规律性(图 6).

1) 第一阶段试验——沙三中(注水深度 3 034~2 838 m). I. 事件记录时间: 整个沙三中地层的监测时段为 2005 年 12 月 3 日—2005 年 12 月 28 日; II. 破裂事件的时空分布特征: ① 该阶段试验过程中破裂事件整体比较少, 信号能量都比较小(图 3). ② 破裂事件基本在杜邦 1 井的 1 km 范围内分布, 其中前 9 天事件与中后期事件的分布特征不同, 2005 年 12 月 3 日—2005 年 12 月 10 日, 事件在平面上大致沿东西向展布, 2005 年 12 月 11 日—2005 年 12 月 28 日, 事件在平面上大致沿北东—南西向展布. ③ 多数破裂事件震源在 3 000 m 左右, 与注水试验深度近于一致. ④ 2005 年 12 月 6 日 17 点 31 分和 12 月 7 日 15 点 27 分泵注压力出现两次异常时的破裂事件均靠近杜邦 1 井. ⑤ 从整个监测时段内破裂事件的时空分布上看, 破裂事件有随时间由东西向向北东—南西向迁移的趋势.

2) 第二阶段试验——沙三上底部(注水深度 2 629~2 707 m). I. 事件记录时间: 2005 年 12 月 29 日—2006 年 2 月 20 日; II. 破裂事件的时空分布特征: ① 在第一次注水后事件明显增多, 2006 年 1 月 4—5 日事件数量最多, 事件的震中扩展到以杜邦 1 井为中心 3 km 范围内. ② 破裂的深度多数分布在 2 700~3 000 m, 事件在水平面上沿南北向展布, 在剖面上呈陡倾角分布, 构成近垂直裂缝.

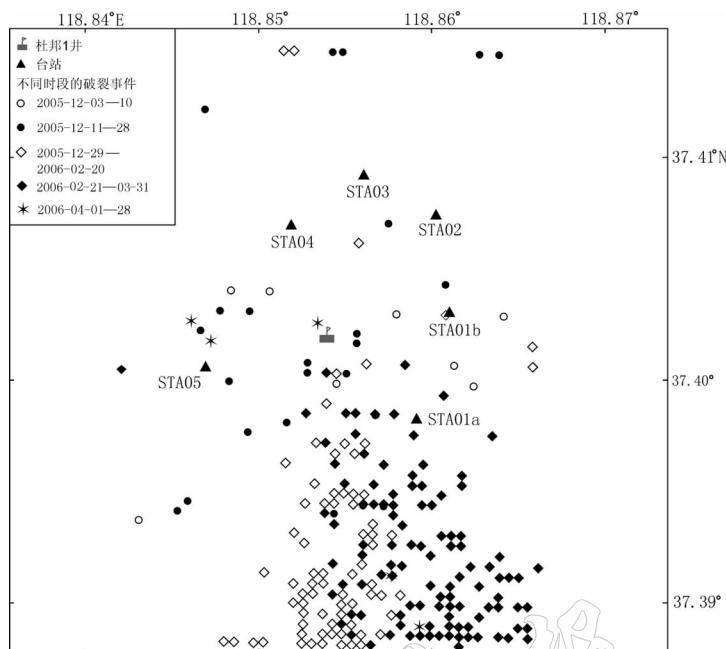


图 6 注水期间破裂事件分布图

3) 第三阶段试验——沙三上顶部(注水深度 2 547.5~2 404 m). I. 事件记录时间: 2006 年 2 月 21 日—2006 年 3 月 31 日; II. 破裂事件的时空分布特征: ① 这一阶段事件最多, 信号能量也最强, ② 很多事件扩展到模型范围外, 在水平面上事件逐渐沿南东向分布. ③ 剖面上若干事件组合构成向南东陡倾的带.

4) 第四阶段试验——沙二段(注水深度 1 635~1 714 m). I. 事件记录时间: 2006 年 4 月 1 日—2006 年 4 月 26 日; II. 破裂事件的时空分布特征: ① 这一阶段事件逐渐减少, 仅监测到 5 个震动事件, 信号能量也逐渐降低(振幅为 200~1 000 counts). ② 在观测模型范围内的事件很少, 一般偏向杜邦 1 井的南侧区域, 震中位置和震源深度测定精度较低.

5) 第五阶段试验——东营组(注水深度 1 294~1 464 m). I. 事件记录时间: 2006 年 4 月 27 日—2006 年 5 月 18 日; II. 微震破裂事件的时空分布特征: 由于杜邦 1 井试验场地施工, 对 5 个地震监测台形成场地噪音, 这一阶段地震事件被噪音掩盖, 信号的能量没有超过噪音.

5 讨论和结论

5.1 讨论

对于注水诱发地震或地层破裂这一现象, 国内外学者都进行了大量研究. 综观国内外注水引发地震事例, 主要可分为两种情况: 一是发生在盐矿区, 由于注水采盐导致地层亏空而引发地层破裂发生地震(商宏宽等, 1986; 徐泽奎, 1989; 张宝红, 邱泽华, 1994; 魏柏林等, 1999); 二是发生在油气田开采矿区(Segall, 1989; David, Pennington, 1989; 赵根模, 张德元, 1995).

发生在油气田开采矿区的注水引发地层破裂事件, 也可分为两种类型: 一是发生在钻

井过程中, 由于钻井水泥浆的漏失、浸泡, 断层发生错动而引发小群震, 例如, 胜利油田角 07 井(卢守安等, 1987), 以及 1972 年 1—2 月石油部在江汉油田武昌王家店所钻的一口深度为 2 189 m 的探井(武汉地震大队水库地震研究队, 1977)。这两起事件的共同点是: 在井的钻进过程中发生井漏, 漏水量少(胜利油田角 07 井 325 m³, 江汉油田 14 301.5 m³), 漏失后当天就发生地震、破裂。

另一种是由于注采不平衡引发的地层亏空或地层过量充注而造成的地层压力过高。高异常地层压力可在先存断裂附近造成地层破裂引发小震群。

当注采比小于 1, 即采出量大于注入量的情况下, 地层发生沉降破坏。例如, 美国得克萨斯的 Goose Creek 油田(Segall, 1989), 美国加利福尼亚 Wilmington 油田(Yerkes, Castle, 1976), 以及国内任丘油田(刘一鸣等, 1984)均属于这种情况。

当注采比大于 1, 即采出量小于注入量的情况下, 地层因过量充注, 压力不断升高而导致地层破坏或滑移、隆起的现象。例如, 胜利临盘油田^①和老君庙油田(冯学才等, 1985)。

值得注意的是在这些油气田钻井及注采引发的地震及地层破裂事件中, 包括美国兰吉利油田、日本松代注水实验, 地层大都有断层分布。胜利油田角 07 井、江汉油田王家店井更是处在断裂带上。

由于污水地下排注要求“只进不出”, 因而不存在地层亏空现象。与注采比大于 1 时的过量充注情况类似, 但更接近于 1962—1969 年美国丹佛附近军工厂深井注水(Healy *et al*, 1968; 武汉地震研究所水库地震研究队, 1978; 龚鸿庆, 1983)、四川荣昌县安富镇安北乡 B 井气田废水回注情形(程式, 刘文泰, 1992)。对四川荣昌县安富镇安北乡 B 井来说, 燕子岩断层在深部正好横切该井。而对于青南凹陷来说, 注水时段的地层并未经断层切割, 破坏性地震事件的发生在一定程度上反映了地层的容储能力。

目前, 通过专门的注水诱发地震试验已发现, 地层的失稳破裂主要发生在渗透段(Harjes *et al*, 1997; 涂毅敏, 陈运泰, 2002)。通过对注水过程中发生的微震求解震源机制, 看到一些较大的微震并非张性破裂所致, 而是呈现剪切滑动特征(House, 1987; Rutledge *et al*, 2004; Evans *et al*, 2005)。Sminchak 和 Gupta(2003)对深井注液诱发地震活动的重要因素进行了探讨, 认为盆地基底的特征(基底面的起伏、基底断裂特征)及作业层内部断裂发育情况、地层非均质特征、地层的孔渗条件等都与诱发地震活动密切相关。

应该说明的是, 在本次注水试验中各注水时段都重复着同一作业过程, 都须在射孔后进行地面及井下起下工具作业, 对各时段从射孔到开始注水期间即注水作业准备阶段的事件记录进行统计(表 2)。

从表 2 中可以看出, 弱胶结、高孔、高渗的沙二段地层, 射孔及注水作业准备阶段没有震动事件记录, 说明高孔、高渗、弱胶结地层不利于震动波的传播; 开始注水后监测到的震动事件也比较少, 只有 5 次, 说明先前注水时段有限的注水量引起的震动破裂事件不会长久持续发生。而中低渗、中等胶结的沙三上底部地层射孔后至注水前只有 4 次震动信号, 说明在井筒内的起下工具作业基本不会产生震动信号, 因而沙三上顶部地层射孔后至注水前的 60 次震动信号反映的应该是沙三上底部地层的持续破裂事件。

^① 山东省地震局, 1998. 震情参阅, 第 9 期。

表 2 杜邦 1 井各注水层段注水作业准备阶段的事件记录统计

层段名	深度/m	措施	年-月-日	震动事件 /次数	备注
沙三中	3 034~2 838	射孔	2005-11-28 2005-11-29—12-02	0	尚未开始记录
沙三上底部	2 629~2 707	射孔	2005-12-29	1	
沙三上顶部	2 547.5~2 404	地面及井下起下工具	2005-12-30—2006-01-02	4	
沙二段	1 635~1 714	射孔	2006-02-21	1	
		地面及井下起下工具	2006-02-22—03-04	60	
东营组	1 294~1 464	射孔	2006-04-01 2006-04-02—04-06	0 0	
			2006-04-29	0	

胜利油田角 07 井(卢守安等, 1987)在钻井过程中发生的地震及地层破裂, 主要是因为钻遇奥陶系灰岩。该套地层位于杜邦 1 井注水层段的下部, 断层及裂缝比较发育, 钻井液的漏失及浸泡而引发了断层活动。在距离 23.21 km 的杜邦测试井进行的监测活动, 整个监测过程没有监测到大于 0.5 级的震动信号, 这可能与注水地层的地质条件有关。根据凹陷内部地球物理剖面及油井的地球物理测井资料显示, 凹陷内部基本无断层发育。同时由于注水量比较小, 注入水不足以到达边界断裂, 引起断层的活动而诱发比较大的地震事件。根据西部东营凹陷相同层段类似沉积环境的油藏描述资料看, 该地层的非均质性较强, 监测到的震动事件更可能是由于地层的非均质性引起地层压力的不均匀分布, 改变了地下的应力状态而使地层局部变形破裂。

在沙三中第一次注水测试中, 震动事件呈现出先后沿两个不同方向展布的趋势, 可能是层段内不同小层破裂事件的反映。由于沙三中地层是低渗透储层, 沿最大水平主压应力方向渗透率一般较高, 因而破裂事件趋向的不同也反映了局部应力状态的变化。

对于沙三上及沙二段的中、高渗透率地层, 注入流体沿主渗流通道渗流, 震动事件的展布趋势则应是主渗流通道方向的反映。在沙三上地层的注水过程中, 震动破裂事件频繁, 可能与沙三上地层的中等胶结程度有关, 由于注入水不均向渗流引起的压力不均匀分布产生的局部应力场变化更易导致地层的微破裂。

5.2 结论

总的说来, 本次监测活动具有以下特征:

1) 整个监测过程没有监测到大于 0.5 级的震动信号, 主要是因为注水测试层段内部断层不发育; 同时由于注水量比较小, 注入水不足以到达边界断裂, 引起边界断裂活动而导致大的地震破坏事件。

2) 本次注水工区靠近青南断裂, 北部青坨子凸起断层及裂缝发育。考虑到凹陷南缘角 07 井(图 1 中的 J07)钻井过程中曾发生过破坏性地震事件, 因而长期注水条件下的地震危险性不容忽视。

3) 震动事件是由于地层的非均质性引起地层压力的不均匀分布, 改变了地下的应力状态而使地层局部变形破裂, 破裂事件局限在注入层段内部。

4) 破裂事件在不同层段的展布趋向不同。在低渗透储层段, 破裂事件沿最大水平主压应力方向展布; 在中高渗透层段, 震动事件可能更多地沿主渗流通道展布。

5) 在中等渗透层段, 可能与沙三上地层中等胶结程度有关, 震动破裂事件频繁。

在本项目执行期间，得到了中国地震应急搜救中心吴建春主任，美国杜邦公司张海腾先生、James Clark先生，壳牌石油公司杨九山博士，美国PDA公司杨应平先生及杜邦测试井现场监理William H. Armstrong、David Freeman、刘文贤先生等的大力支持，也得到东营市地震局和胜利油田的大力支持。在此一并表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- 陈国光,徐杰,马宗晋,等. 2004. 渤海盆地现代构造应力场与强震活动[J]. 地震学报, **26**(4): 396-403.
- 程式,刘文泰. 1992. 中国注水诱发地震的又一个实例[J]. 地震, (1): 63-66.
- 董瑞树,蒋秀琴. 1985. 渤海周围地区地震震源机制解和应力场特征[J]. 东北地震研究, **1**(1): 55-62.
- 冯学才,崔中元,贾文山. 1985. 注水引起的局部构造活动及其与地震的关系[J]. 中国地震, **1**(3): 67-71.
- 高建理,丁健民,梁国平,等. 1987. 华北地区盆地内地壳应力随深度的变化[J]. 中国地震, **3**(4): 82-89.
- 高建理,丁健民,梁国平,等. 1992. 中国海区及其邻域的原地应力状态[J]. 地震学报, **14**(1): 17-28.
- 龚庆洪. 1983. 关于控制水库地震的理论及其可能性的讨论[J]. 华南地震, **3**(4): 54-58.
- 李平,卢良玉,卢造勋,等. 2001. 辽宁及邻区地壳构造应力场及其与地震活动关系的三维有限元数值模拟研究[J]. 地震学报, **23**(1): 24-35.
- 刘一鸣,和景昊,陈家庚,等. 1984. 任丘油田开发与地震活动[G]//国家地震局地震研究所编. 中国诱发地震. 北京: 地震出版社: 183-188.
- 卢守安,苏鸾声,陈正品,等. 1987. 山东角07井注(漏)水诱发地震: 地表宏观现象与震群活动特点[J]. 地震地质, **9**(3): 79-83.
- 商宏宽,常宝琦,刘晓年. 1986. 诱发地震对策[G]//郭增建,陈鑫连编. 地震对策. 北京: 地震出版社: 9-13.
- 孙叶,谭成轩. 1995. 中国现今区域构造应力场与地壳运动趋势分析[J]. 地质力学学报, **1**(3): 1-12.
- 涂毅敏,陈运泰. 2002. 德国大陆超深钻井注水诱发地震的精确定位[J]. 地震学报, **24**(6): 587-598.
- 魏柏林,郭钦华,李纯清,等. 1999. 论三水地震的成因[J]. 中国地震, **15**(3): 247-256.
- 武汉地震大队水库地震研究队. 1977. 深井注水地震[J]. 地震战线, (3): 21-23.
- 武汉地震研究所水库地震研究队. 1978. 美国落基山注水地震[J]. 地震战线, (6): 7-8.
- 谢富仁,崔效锋,赵建涛. 2003. 全球应力场与构造分析[J]. 地学前缘, **10**(特刊): 22-30.
- 徐泽奎. 1989. 罗城地区的地质构造与注水采盐诱发地震[J]. 西北地震学报, **11**(3): 96-98.
- 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等. 1989. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, **32**(6): 636-647.
- 许忠淮,闫明,赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, **5**(3): 268-279.
- 张宝红,邱泽华. 1994. 关于注水地震研究的几个问题[J]. 现代地质, **8**(3): 329-333.
- 赵根模,张德元. 1995. 注水诱发地震研究[M]. 北京: 地震出版社: 46-68.
- 宗国洪,肖焕钦,李常宝,等. 1999. 济阳坳陷构造演化及其大地构造意义[J]. 高校地质学报, **5**(3): 275-282.
- Crosson R S. 1972. Small earthquakes, structure, and tectonics of the Puget Sound region[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **62**: 1 133-1 171.
- Davis S D, Pennington W D. 1989. Induced seismic deformation in the Cogdell oil field of west Texas[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **79**: 1 477-1 494.
- Evans K F, Moria H, Niituma H, et al. 2005. Microseismicity and permeability enhancement of hydrogeologic structures during massive fluid injections into granite at 3km depth at the Soultz HDR site[J]. *Geophys J Int*, **160**: 388-412.
- Healy J H, Rubey W W, Griggs D T, et al. 1968. The Denver earthquakes[J]. *Science*, **161**: 1 301-1 304.
- Harjes H P, Bram K, Duerbaum H J, et al. 1997. Origin and nature of crustal reflections: Results from integrated seismic measurements at the KTB super-deep drilling site[J]. *J Geophys Res*, **102**(B8): 18 267-18 288.
- House L. 1987. Locating micro-earthquakes induced by hydraulic fracturing in crystalline rock[J]. *Geophys Res Lett*, **14**(9): 919-921.

- Rutledge J T, Phillips W S, Mayerhofer M J. 2004. Faulting induced by forced fluid injection and fluid flow forced by faulting: An interpretation hydraulic-fracturing micro-seismicity, Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **94**(5): 1 817-1 830.
- Sminchak J, Gupta N. 2003. Aspects of induced seismic activity and deep-well sequestration of carbon dioxide[J]. *Environmental Geosciences*, **10**(2): 81-89.
- Segall P. 1989. Earthquakes triggered by fluid extraction[J]. *Geology*, **17**(10): 942-946.
- Yerkes R F, Castle R O. 1976. Seismicity and faulting attributable to fluid extraction[J]. *Engineering Geology*, **10**(24): 151-167.

ANALYSIS OF INJECTION-INDUCED FAILURE FOR DUPONT WELL 1, DONGYING, SHANDONG PROVINCE

Li Xingchuan¹⁾ Guo Biao¹⁾ Qu Guosheng²⁾ Liu Qiyuan¹⁾
Li Shuncheng¹⁾ Chen Jiuhui¹⁾ Li Yanfeng²⁾ Xie Xiaofeng²⁾

1) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2) National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China

Abstract: From December 3, 2005 to May 18, 2006, a water injection-induced seismicity test was conducted on DuPont test well 1 for about six months by China Earthquake Administration. To the vertical injected well, 11 water injection processes were conducted on four depth intervals, including middle Shahejie3, the top of the upper Shahejie3, the bottom of the upper Shahejie3 and Shahejie2, with the vertical span from 1 464 m to 3 034 m. Monitoring stations has been run throughout the procedure. From the recorded data, there were 5 090 events being picked out manually, 274 events located. It indicates that the energy of seismic signal is very small, and the largest magnitude is no more than $M_{L}0.5$. And also, the major energy is centered on the vertical component, while amplitude of the other horizontal components is very small. From the start of water injection, the number of seismic events varied with time. And the event was most frequent in the period of upper Shahejie3 injection. The distribution of events extended from the injected well to the outside with time, and the direction of events distribution rotated in different injected interval. Of which, in the low permeability interval, events trend close to the direction of principal compressive stress direction; while in higher permeability interval, they trend close to the predominant seepage direction.

Key words: injection-induced seismicity; formation failure; seismic monitoring; earthquake location