

# 任邱油田注水地震的初步研究

刁桂苓

张德元

赵根模

(河北省地震局)

(大港油田)

(天津市地震局)

## 摘 要

任邱地区历史上地震少而弱。1976年12月油田开始注水,注水前无微震记录,注水后三个月即有地震发生,随注水量增加,地震活动增强,地震活动特点是:注水量二阶差分 $\Delta^2 y_i$  (正值)较高后一至三个月有地震发生; $\Delta^2 y_i$ 大小与地震强度相关;震中分布受注水井位置控制;地震序例b值为0.65;单台初动符号及振幅比比较一致。初步研究认为:本区岩石为多孔隙岩石,断裂较多,注水使孔隙压力增大,降低了断层面上的摩擦阻力,积累的应力便以地震形式释放。

## 一、引 言

六十年代初期,美国丹佛深井注水引起地震活动频繁,停止注水后,地震活动减弱〔1〕。这一现象引起人们的普遍重视。此后,1969—1971年美国地质调查局在兰吉利油田的四口深井进行了注水与抽水试验,证实了注水与地震活动的依赖关系〔2〕。1970年日本防灾研究所在皆神山北麓松代地震断层附近,用深井向地下注水,在与注水相关的29天内,记录到约4000个地震〔3〕。根据深井注水触发地震的事实,希利(J.H.Healy)〔4〕、安艺敬一〔5〕、布雷迪(B.T.Brady)〔6〕、郭增建〔7〕等分别提出不同的用水控制地震的方案,大大开阔了地震工作者的视野。这些设想的实施还存在种种问题,但地震的最终控制不是不可能的。

任邱属少震的县,1976年以前的八年中,没有小震发生。自1976年底油田注水开采到1980年8月已发生小震33次。油田深井注水与地震活动在时间上的吻合,是否反映它们之间具有内在的联系,则是本文研究的课题。

## 二、任邱油田地区概况

任邱油田面积约67平方公里,呈椭圆形,长轴走向北北东,位于冀中拗陷的中段。油田区地壳上部是厚约8公里的新生界、下古生界和震旦界的泥岩、砂岩和厚层石灰岩,下部为20—30公里的结晶基底,由古老的变质岩、花岗岩、混合岩以及玄武岩组成。已经发现有

两组断裂，北北东走向的一组断裂主要分布在地壳上部，另一组为北西西向，主要发育在地壳下部基底中（见图1）。油田构造主要由震旦亚界和下古生界厚层碳酸盐质灰岩组成的一系列轴向东北的背斜和向斜构成，这些构造被走向北北东、北东、北西西向断裂切割成半背斜或单斜断块潜山。

油田构造岩体由多孔隙岩石组成，且断裂较多，地下连通情况良好。为了保持原油的稳定高产及尽可能高的采收率，油田采取控制注水量和注水速度的工艺，从而使油水界面推进均匀。同时，由于油田的岩石、断裂及连通情况等条件，决定了它自身具有比较稳定而统一的油水界面、压力系统、温度系数。图2给出了油田开采的逐月注水量、采出量和定期观测的地层压力，这些数据可以综合概括地反映油田地下的动态。

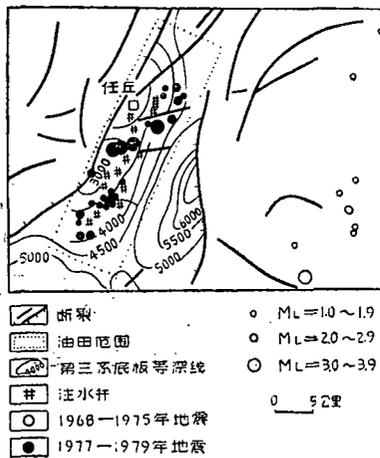


图1 油田构造与地震活动

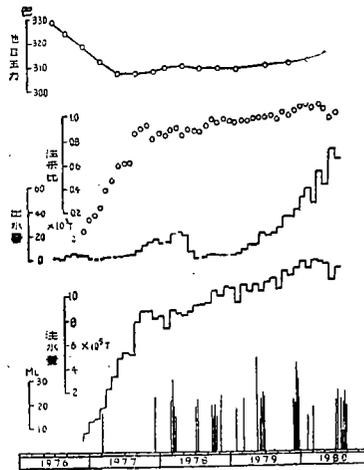


图2 油田开采与地震活动

### 三、地震活动性

查阅历史地震和现代仪器记录资料（表1），任邱油田处于河北平原地震带的中段，附近发生过破坏性地震（河间、沧县、大城），但任邱属于地震活动较弱的县。距任邱20公里的河间在1068年8月发生6级地震后，五个月内任邱有两次4级地震，而这两次地震的发生可能与6级地震的触发有关。此后仅于1596年12月发生过一次有感弱震，其余时间均无地震记载。1967年河间再次发生6.3级地震，仅引起任邱发生四次1—2级小震。1969—1976年的八年时间，未检测到任何小震发生，呈现平静状态。

油田自1976年12月开始注水，1977年3月—1980年8月已发生了33次地震，其中  $M_L \geq 3.0$  级的地震4次，1979年5月和12月的地震（ $M_L = 3.6, 3.7$ ）当地明显有感。这种频繁的地震活动引起人们的关注\*。

图1给出了注水井的位置及1968年以来的地震震中分布。注水前的地震都发生在距油田

\* 张德元，任邱油田注水情况汇报，1979。

表 1

| 序号 | 日期         | 时分    | 北纬                | 东经                  | 震级   | 备注                 |
|----|------------|-------|-------------------|---------------------|------|--------------------|
| 1  | (1068.8.14 |       | 38.5°             | 116.1°              | 6)   | 河间地震               |
| 2  | 1068.10.17 |       | 38.7°             | 116.1°              | 4    |                    |
| 3  | 1068.12.23 |       | 38.7°             | 116.1°              | 4    |                    |
| 4  | 1596.12    |       | 38.7°             | 116.1°              |      | 有感                 |
| 5  | (1967.8.27 |       | 38.5°             | 116.5°              | 6.3) | 河间地震               |
| 6  | 1967.4.8   | 07—55 | 38°35'            | 116°08'             | 1.0  | 以下震级M <sub>L</sub> |
| 7  | 1967.9.28  | 17—41 | 38°43'            | 116°10'             | 1.3  |                    |
| 8  | 1967.12.24 | 02—03 | 38°35'            | 116°10'             | 2.2  |                    |
| 9  | 1968.8.9   | 18—55 | 38°42'            | 116°07'             | 1.9  |                    |
| 10 | 1977.8.8   | 09—12 | 38°46'            | 116.11'             | 1.6  |                    |
| 11 | 1977.12.7  | 08—12 | 38°38'            | 116°03'             | 2.3  |                    |
| 12 | 1978.8.10  | 23—18 | 38°35'            | 116°05'             | 2.2  |                    |
| 13 | 1978.8.22  | 22—58 |                   |                     | 1.8  |                    |
| 14 | 1978.8.23  | 02—18 | 38°34'            | 116°11'             | 3.0  |                    |
| 15 | 1978.8.27  | 03—03 | 38°41'            | 116°09'             | 1.9  |                    |
| 16 | 1978.8.27  | 03—39 |                   |                     | 1.5  |                    |
| 17 | 1978.7.10  | 05—53 | 38°33'            | 116°02'             | 1.9  |                    |
| 18 | 1978.7.10  | 08—23 |                   |                     | 2.2  |                    |
| 19 | 1978.10.23 | 17—33 | 38°35'            | 116°07'             | 2.0  |                    |
| 20 | 1978.10.23 | 18—56 | 38°35'            | 116°07'             | 1.5  |                    |
| 21 | 1978.10.23 | 19—20 | 38°43'            | 116°14'             | 2.0  |                    |
| 22 | 1978.10.23 | 22—11 |                   |                     | 1.5  |                    |
| 23 | 1978.11.25 | 07—13 | 38°30'            | 116°03'             | 2.4  |                    |
| 24 | 1979.2.2   | 03—31 | 38°36'            | 116°12'             | 1.8  |                    |
| 25 | 1979.8.12  | 19—03 | 38°30'            | 116°05'             | 2.2  |                    |
| 26 | 1979.5.26  | 10—13 | 38°41'<br>(38°36' | 116°10'<br>116°06') | 3.9  |                    |
| 27 | 1979.6.7   | 23—46 | 38°37'            | 116°08'             | 1.3  |                    |
| 28 | 1979.6.21  | 23—33 | 38°34'            | 116°05'             | 2.2  |                    |
| 29 | 1979.6.22  | 01—53 | 38.34'            | 116°05'             | 2.5  |                    |
| 30 | 1979.6.22  | 14—12 | 38°35'            | 116°06'             | 2.3  |                    |
| 31 | 1979.12.14 | 23—56 | 38°32'            | 116°12'             | 2.2  |                    |
| 32 | 1979.12.18 | 10—10 | 38°41'            | 116°12'             | 2.0  |                    |
| 33 | 1979.12.18 | 23—16 | 38°33'<br>(38°39' | 116°09'<br>116°03') | 3.7  |                    |
| 34 | 1979.12.19 | 00—05 | (38°39'           | 116°03')            | 3.0  |                    |
| 35 | 1980.2.26  | 07—08 | 38°38'            | 116°10'             | 1.5  |                    |
| 36 | 198.8.8    | 06—42 | 38°37'            | 116°12'             | 1.9  |                    |
| 37 | 1980.7.8   | 14—06 | 38°45'            | 116°04'             | 2.2  |                    |
| 38 | 1980.7.18  | 02—07 | 38°35'            | 116°03'             | 2.5  |                    |
| 39 | 1980.8.27  | 05—18 | 38°35'            | 116°10'             | 2.5  |                    |
| 40 | 1980.8.27  | 05—19 | 38°35'            | 116°10'             | 2.0  |                    |
| 41 | 1980.8.27  | 05—20 | 38°35'            | 116°10'             | 2.5  |                    |
| 42 | 1980.8.27  | 05—28 | 38°35'            | 116°10'             | 1.8  |                    |

\* 为地方台网测定震中

较远的地区，而注水后发生的地震全部集中在油田范围之内，大体上分布在任西断裂与南马庄断裂之间。33次地震呈北东向展布，与注水井的分布一致。四次3级地震震中靠近注水

井。在辛中驿断裂附近有一个小震密集区，这里也是注水井较多的地方。文安单台资料所得  $t_{\bar{S}-\bar{P}}$  的数据（表2）变化很小，也证实震中分布应当比较集中。

表2

| 地震序号                  | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 25  | 27  | 28  | 29  | 32  | 33  |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $t_{\bar{S}-\bar{P}}$ | 5.0 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 4.9 | 5.1 | 5.0 | 4.9 | 5.1 | 4.9 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 4.9 |
| 初动                    | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   | (+) | (-) | +   |     | +   |     |     | (-) | +   |     |

全部序列中有四次3级以上地震，最大的是  $M_L = 3.9、3.7$ ，没有突出的主震，显示震群活动的性质。同样，美国的落基山、兰吉利，日本的松代注水地震也是震群活动。任邱序列震级频度关系中的  $b = 0.65 \pm 0.03$ ，这与兰吉利序列  $b = 0.81、0.96$ ，松代序列  $b = 0.92、0.90、1.07$  相比是较低的。任邱地震序列中小于1.5级的地震很少，这可能与台站较远，放大倍率低、拾震能力差有关。漏记小震也可能是引起  $b$  值偏低的原因。序列的全部能量相当于一个  $M_S = 4.0$  级地震。

从文安台得到的垂直向记录  $\bar{P}$  波  $\bar{S}$  波振幅比及  $\bar{P}$  波初动方向比较一致（表2）。由于台站较少，不能提供充足的地震波初动资料，未能求得断层解。据文献〔8〕可以认为，振幅比及初动符号的一致性，反映了这些地震的震源机制是大体相同的。

据北京台网的资料（表1），我们用和达法计算了任邱及附近地区的波速比  $K (K = V_{\bar{P}}/V_{\bar{S}})$ ，任邱外围地区除一个数据偏低之外，其余波速比值均属于正常值。而  $K$  值较低的点则大都集中在任邱（图3）。波速比值的高低，不仅和膨胀—扩容有关，还与震源深度有关。震源越浅， $K$  值越低。

一般注水地震的频度（日或月）较高，而任邱地震频度较低，平均每月一次，这可能与油田注采比值较小有关。注水地震的震源深度一般都是发生在注水井以下1—2公里的地方。由于台网的关系，我们得不出任邱地区精确的震源深度值。

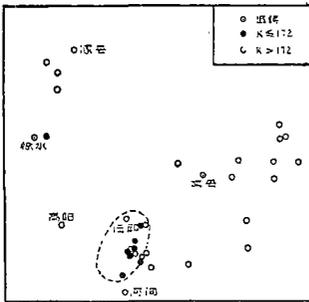


图3 地震波速比及震中分布图

### 四、注水和地震的关系

从图2给出的油田开采数据曲线和地震序列中可以看出：油田开采初期，地层压力下降迅速，此时没有注水，地震也没有发生。开始注水后三个月，地层压力下降缓和并开始稳定于310巴左右的水平，此时发生第一个小震。随着注水量逐步加大，致使产油量保持稳定。当注水量超过采出量之后，地震的频度和强度也增加到一定的活动水平。

地震发生的时间间隔是不均匀的，其原因和注水的变化有关。用差分法对注水的数据进行处理，可以消除长周期的漂移，而突出时间序列的高频变化。月注水量是一种速度值，取它的一阶差分  $\Delta Y_i$ ，得到的是注水加速度，求出它的二阶差分  $\Delta^2 Y_i$ ，得到的是注加速度的增量，或者可以认为是一种加载力的变化。将注水量的二阶差分（取正值）与每月地震能量的对数随时间变化绘于图4。所有地震都是在  $\Delta^2 Y_i$  变化幅度较大之后的一至三个月发生

的，这种注水量的大幅度变化与地震的明显对应关系证实它是触发地震的主要因素。

我们分析了 $\Delta^2 Y_i$ 、 $\lg \Sigma E$ 、地震频度随时间的累积增长情况（图5）。可以看出，当

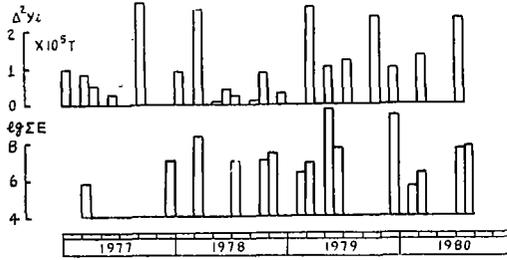


图4 每月注水量变化与地震能量对比

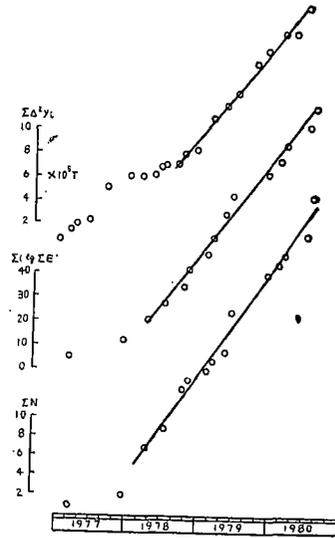


图5 注水量变化、地震能量、频度累计对比图

条件一定时，即注水量变化为稳定增长（线性）时，地震的能量的释放速度和频度也比较均匀。以下给出几条曲线计算所得结果：

$$\Sigma \Delta^2 Y_i = 7.29 \times 10^5 + 5.79 \times 10^4 t \quad (r = 0.99)$$

$$\Sigma (\lg \Sigma E) = 36.52 + 3.13t \quad (r = 0.99)$$

$$\Sigma N = 5.17 + 0.876t \quad (r = 0.99)$$

每一条回归直线的相关系数 $r$ 都很高，可以认为三种参量随时间的增长一致，说明注水量引起地震发生的关系可靠，而且注水量的变化速度对发生地震的强度、频度的制约关系也是可靠的。计算地震发生的强度及与其对应的注水量变化，即 $\lg \Sigma E$ 与 $\Delta^2 Y_i$ 的关系得出：

$$\lg \Sigma E = 6.48 + 9.49 \times 10^{-6} \Delta^2 Y_i \quad (r = 0.82)$$

结果显示： $\Delta^2 Y_i$ 变幅大，发生的地震也强。

任邱油田为保持产量稳定，尽量提高采收率，要求油水界面推进均匀，采取了控制注水量和注水速度的措施。注水量的变化被限制在一固定的范围，注水量变化随时间的增长也被控制而力求稳定。因此地震的能量的释放速度和频度比较均匀。

### 五、讨论和建议

任邱位于现代地震活动带上，该区从1978年以来发现地壳形变有显著异常，文安与保定地区抬升，任邱下沉，可能已积累了可观的应力。

按照哈伯特和鲁比的理论，断层面上有效正应力 $\sigma$ 由下式给出：

$$\sigma = P - \rho \tag{1}$$

式中 $P$ 为断层两盘间的正应力， $\rho$ 为孔隙压力。

根据摩尔和库仑的理论,当岩石任意截面上的剪应力达到临界值,该截面将出现错动,错动值由下式给出:

$$\tau = \tau_0 + \sigma t_{an} \phi \quad (2)$$

式中 $\tau$ 为截面错动剪应力的临界值, $\tau_0$ 为断层面两盘间的粘结强度, $\sigma$ 为断层面上的正应力, $\phi$ 为内摩擦角。把(1)式代入(2)式则得:

$$\tau = \tau_0 + (P - \rho) t_{an} \phi \quad (3)$$

注水地震发生在已有断层面上,而且有水的渗入, $\tau_0$ 值不很高;当孔隙压力 $\rho$ 增加时, $(P - \rho) t_{an} \phi$ 则大大降低。因而在不很大的构造应力作用下,即可造成断层错动,发生地震[7][9]。

任邱油田储油构造由众多的半背斜与切断它们的断层构成,岩石系多孔岩石。注水可以减小粘结强度 $\tau_0$ ,增加孔隙压力 $\rho$ ,相应降低了断层错动所需剪应力的临界值,况且任邱地区已积累有一定的应力,则地震得以断续发生。注水量二阶差分数值较高时,实质是给地下岩石一加载力,形成较高的孔隙压力,因而便发生地震。我们估计只要油田注水和采出的比率保持在一定的水平,注水量的改变尽可能均匀,避免大幅度涨落,地震活动的规模不会太大。但对形变异常的背景,仍需慎重考虑。

因为现有台网的观测精度不能满足注水地震研究的要求。建议在油田设立临时台网或台阵进行必要的观测,提供丰富而准确的地震参数,以便进一步深入研究。

本文写作中蒙任邱油田采油研究所、地质处和科技处提供了宝贵资料,李钦祖同志提出了宝贵意见,在此一并致谢。

(本文1980年12月11日收到)

### 参 考 文 献

- [1] 武汉水库地震队, 美国洛基山注水地震, 地震战线, №. 6, 1978.
- [2] Raleigh, C.B. et al., 科罗拉多州兰杰利油田的地震控制实验, 国外地质, №. 6, 1977.
- [3] M. Ohtake., 日本松代注水诱发的地震, 国外地质, №. 10, 1977.
- [4] J.H. Healy. et al., 展望地震的预报与控制, 科学技术参考资料(国外地震资料) 1973.
- [5] K. Aki., Recent Results on the Mechanism of Earthquakes With Implication for the Prediction and Control Program, Tectonophysics 14, 3—4, 1972.
- [6] B.T. Brady., 地震理论(二), 地壳地震包体理论, 地震理论与实验译文集, 地震出版社, 1979.
- [7] 郭增建、秦保燕, 震源物理, 地震出版社, 1979.
- [8] 陈颀, 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数, 地球物理学报, Vol. 21, №. 2, 1978.
- [9] 武汉水库地震队, 深井注水地震, 地震战线, №. 3, 1977.

## PRELIMINARY STUDY ON WATER INJECTION EARTHQUAKE OF RENQIU OIL-FIELD

Diao Gui-ling

(*Seismological Bureau of Hebei Province*)

Zhang De-yuan

(*Dagang Oil-field*)

Zhao Gen-mo

(*Seismological Bureau of Tianjin City*)

### Abstract

There were few and small earthquakes occurred in the history in Renqiu oil-field area. The water injection began to be made in December 1976 in this area. During the period of eight years before the water injection, no microearthquakes were recorded at all, but three months after the water injection, earthquakes occurred. With the increase of Water-injecting amount, seismic activity increased. Up to now there have been four felt earthquakes occurred in this area. The features of the seismic activity are: in the period of one to three months after second order difference  $\Delta^2 y_1$  (being positive value) of the water-injecting amount reaching a high value, earthquakes occurred,  $\Delta^2 y_1$  was related with seismic energies; the distribution of epicenters was controlled by the water-injecting well position; b value of the earthquake sequence was 0.65; and both first motion senses and ratio of amplitudes at a single station were relatively consistent. The preliminary study shows that rocks of this area are porous rocks and have more fractures, and that the water injection made the pore pressure increase and lowered the frictional resistance at fault surface so that the stress accumulated in the oil-field crust was released by earthquakes.