

唐山地震前后渤海湾地区油井 动态的异常变化*

张德元 赵根模
(大港油田) (天津市地震局)

摘要

本文汇集和分析了唐山地震前后(1970—1980年),渤海湾地区各油田的油井动态资料,结果表明:

- 一、大地震的孕育和发生对油井动态有所影响。
- 二、唐山地震前的油井动态异常主要表现为油产量和井压的大幅度升降。
- 三、唐山地震前后井口压力实测曲线形态与水压致裂法测量地应力时,岩石破裂前后的曲线很相似。
- 四、天然地层压力驱动的油井显示了清楚的震前变化,但这类井在油田只占极少数,而且迟早会转化为人工驱动型井,使问题复杂化。

一、引言

石油(和天然气)作为地下流体由于埋藏较深、封闭条件好,其动态可以比较清楚地反映地壳应力场的变化。1976年唐山大地震发生前后,渤海湾周边与海湾内的几个油田都发现了油井动态的异常变化^①。为了积累这部分经验,本文对唐山地震前后约十年的资料进行了归纳和分析,以做为今后工作的参考。另外由于这些油田位于我国东部浅源破坏性强震频发地区,历史上和现代已经发生过多次7—8.5级的大地震,因此无论是从大震预报角度,还是从维护油田生产的角度,总结这些经验都是有意义的。

二、油井动态资料的特点

油井动态资料主要指油、气和水的产量、井下地层压力、井口压力、油气比和油层温度等。地震前后动态异常主要表现在压力和产量的变化。液体从地层向井孔内流动可由下式表达:

$$\int_{P_j}^{P_D} dP = \frac{Q \cdot \mu}{2\pi k h} \int_{r_j}^{R_G} \frac{dr}{r}$$

* 1981年9月14日收到初稿,1982年12月13日收到修改稿。

① 吴振林等,油水井异常与海城、唐山地震的关系,1978;大港油田地震办公室,唐山地震与油田深井变化,1978;胜利油田地震办公室,胜利油田深井动态与地震的关系,1979。

式中 Q 为产量, μ 为液体粘度, k 为地层渗透率, h 为地层厚度, P_D 及 P_i 为地层压力及井底压力, R_G 及 r_j 为供油外缘及井孔的半径。

上式可表为:

$$Q = \frac{2\pi k h}{\mu} \frac{P_D - P_i}{l_n} \frac{R_G}{r_j}$$

简化为: $Q = K(P_D - P_i) = K \cdot \Delta P$

由上式可知, 油井产量主要反映了地层压力的变化。

测量油井地层压力采用深井压力计 (CY613A, CY613B型), 精度等级 0.5%, 测量深度影响 $\leq 1 \text{ at/KM}$ 。油井产量根据每日现场量油作为当日产量。由于油田资料录取制度相当严格, 数据连续可靠。

靠天然地层压力开采的油井, 压力逐渐下降, 产量随时间正常递减, 随着油层压力的降低, 产量曲线呈渐变状态, 有一定规律, 由于人工影响小, 震前变化反映较清楚。这类井孔在油田中所占比例甚小, 约为百分之几, 但绝对数尚属可观。本文讨论中选择的代表性曲线主要是这类油井。

任何油井或迟或早都要转化为人工驱动型井, 这是为保持稳产高产的必要措施。这意味着油田绝大多数井孔动态都要受到工作制度 (如改变油嘴等)、邻井开采、增产措施 (注水、压裂、热洗、酸化) 等人工影响, 条件不稳定 (图 1)。为了观测震前油井的变化, 克服少量典型井孔资料的局限性, 也有必要对大量井孔资料进行处理, 以便压低人工影响, 突出那些可能与地震过程有关的变化。

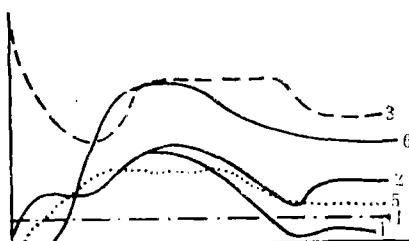


图 1 人工注水前后油井动态变化

1. 采油量, 2. 采水量, 3. 油层压力
4. 油气比, 5. 井数, 6. 注水量

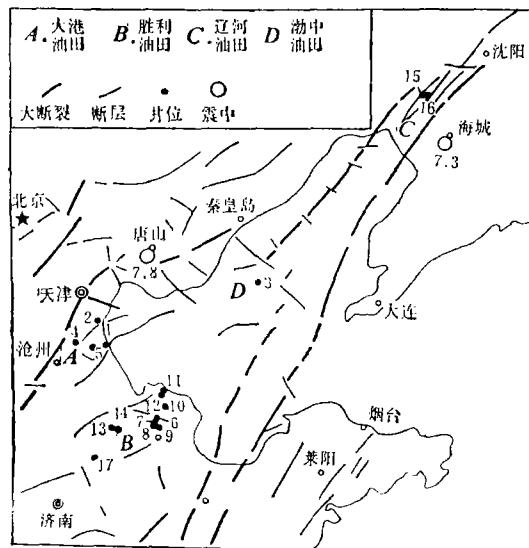


图 2 油井位置与地震分布图

(图中数字为油井顺序号,
同表 1)

三、油井动态异常现象描述

本文讨论的范围包括渤海湾周边及湾内的四个油田。图2给出了油田位置和所涉及的油井位置。油井编号与附表的序号及插图中的井号是一致的。四个油田分布在北北东走向的渤海湾新生代断陷盆地中部及边缘，盆地东侧是著名的郯城—庐江—营口大断裂带，西侧是规模较小的沧东断裂带。油气储存于厚达数千米的中新生代细粒碎屑岩或古生代碳酸盐岩层中。油田距唐山震中约100—400公里。表1列出16口代表性油井的产量、压力变化及观测井段、构造部位等资料。概括起来，特征如下：

表1 油井动态典型异常情况简表

油井顺 序号	油 井 代 号	震中距 (公里)	油层深度 (米)	异 常 情 况		构造部位
				出 现 时 间 (年. 月. 日)	异 常 特 点	
1	庄 9-13	130	1607.5±12	1976.6.17 1976.7.10	井口压力由 20 升至 28at 再次上升至 52at	黄骅拗陷羊二庄 断裂附近
2	板 15	90	2725±25	1976.5	地层压力上升 21at	黄骅拗陷大张坨 断裂附近
3	渤 中 2	160	3070.3±26	1976.7.15 1976.11.4	产油量下降 30% 产油量下降 44%	渤中拗陷郯—庐 断裂带附近
4	旺 11	125	2528±16	1976.6.16 1976.6.30 1976.7.4	暂闭井自动喷油 850kg. 第二次自喷 1500kg.	沧东断裂附近
5	歧 5	130	2134±8	1973.12 1975.11 1976.7.18	产油量下降—加速下降 产油量突跳式变化	黄骅拗陷南大港 断裂附近
6	5-13	250	1900±34	1976.7.22	产油量由 15 吨/日增至 80 吨/日	东营拗陷
7	8-21	251	1923±89	1974.8	产油量由 50 吨/日增至 140 吨/日	东营拗陷
8	9-29	254	1972±12	1976.4.20	产油量由 15 吨/日增至 80 吨/日	东营拗陷
9	9-21	252	1934±89	1974.7	产油量由 45 吨/日增至 80 吨/日	东营拗陷
10	垦 55	235	1839±9	1974.2	产油量由 90 吨/日增至 140 吨/日	东营拗陷
11	义 11	230	2899±7	1976.7.24	产油量由 75 吨/日增至 85 吨/日	东营拗陷
12	义 47	230	2916±23	1976.3	地层压力上升 15at	东营拗陷
13	滨 101	240	1908±39	1975.12 1976.6.30	地层压力上升 20at 产油量突升 100%	东营拗陷
14	滨 111	240	2265±53	1976.7.23	产油量由 40 吨/日突增至 90 吨/日	东营拗陷
15	兴 5	380	1850±17	1974.10.9 1976.1.26	产液量由 2 吨/日上升至 46 吨/日 产液量由 2 吨/日上升至 37 吨/日	辽河拗陷
16	兴 201	380	1586±2	1976.7.9	地层压力上升 8.2at	辽河拗陷

1. 震前约两年出现趋势性异常变化

在1970—1980年渤海湾周边发生了两次大地震——1975年2月海城地震和1976年

唐山大地震。典型的异常情况是在 1974 年中产量明显增加, 1975 年达到峰值, 然后明显下降, 海城地震发生在上升阶段内, 唐山地震发生在下降过程中(图 3)。其中兴 5 井异常很突出, 在 1974 年 10 月产量明显增加, 较正常情况增加约 23 倍, 其中叠加着海城地震的短期异常, 海城地震后恢复正常, 至 1976 年 1 月再次增加, 相当于正常情况的 18 倍, 此时采取了人工放喷措施, 遂使异常资料中断, 尽管如此, 异常仍然非常显著。总之重复出现的两次大地震与重复出现的产量变化是一致的。可以把从 1974 年开始出现的异常视为一个由大范围应力场增强引起的统一变化。

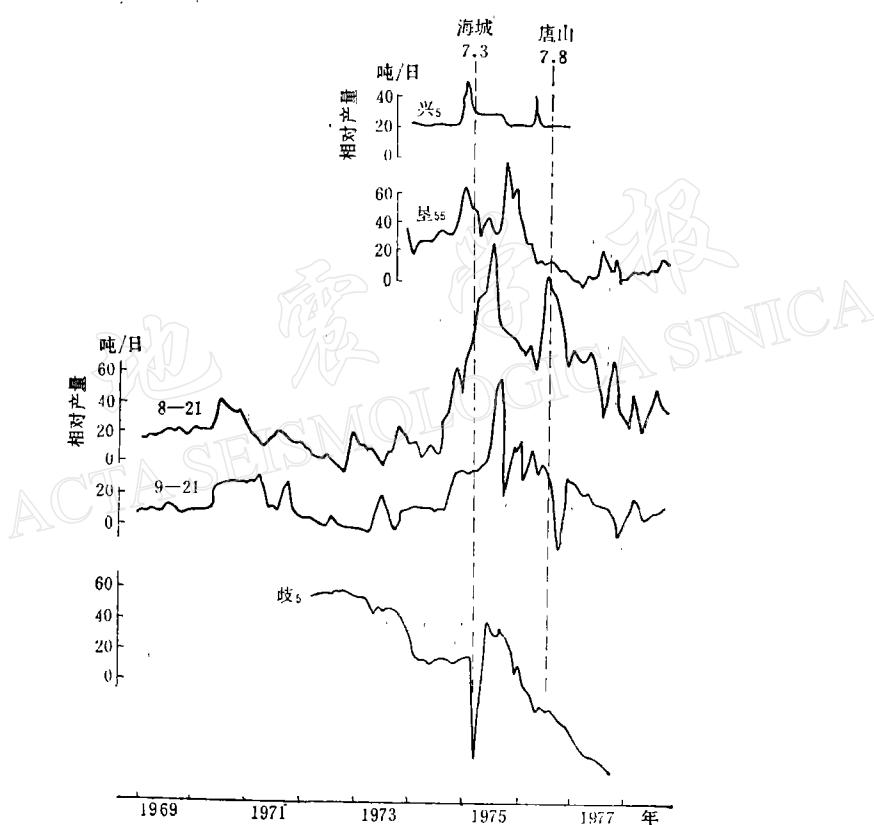


图 3 油产量的趋势变化

在大多数油井异常表现为产量增加的情况下, 也发现少数油井表现为异常下降。例如 5 号井 1973 年以前正常递减, 1973 年底至 1974 年初异常下降, 海城地震后更大幅度下降, 由 135 吨/日突降至 40 吨/日, 被迫进行酸化处理, 产量回升, 到 1975 年 11 月至 1976 年初再次异常下降。

地层压力实测曲线也证实了上述变化过程, 以 16 号井地层压力随时间变化曲线为例(图 4)。该井压力在 1973—1974 年由于开采迅速下降, 1975 年下降速度变小, 1976 年转而上升。胜利油田的 12 号井, 1976 年 4 月后压力与之同步上升。在此期间未采取任何人工措施。这部分异常实测又可分为震前两年与震前几个月两个阶段。

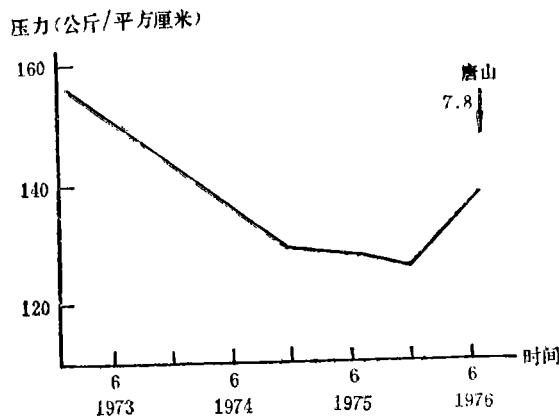


图 4 兴 201 井地层压力变化

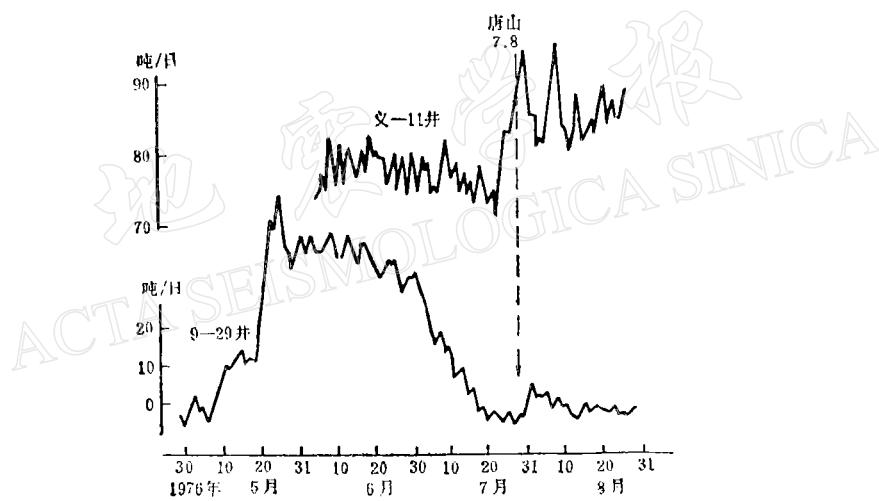


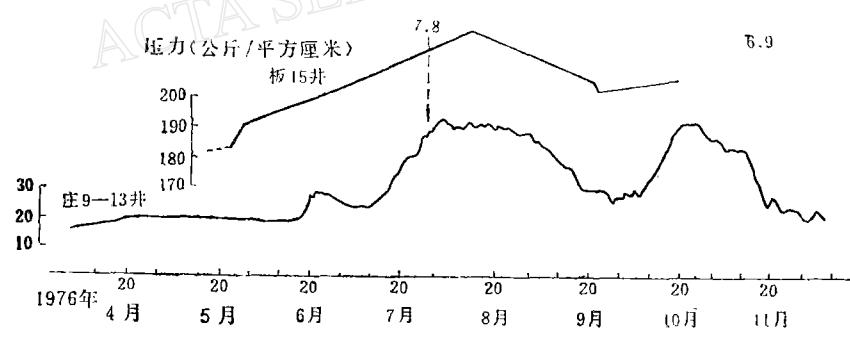
图 5 油产量的短期变化

表 2 渤中 2 井产量变化

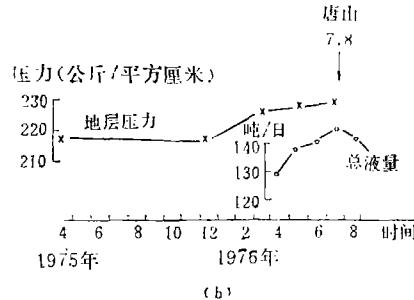
时间 (年. 月. 日)	日产液量 (吨/日)
唐山地震前	1976.7.1 220.1
	7.5 220.8
	7.10 199.2
	7.15 147.6
	7.20 126.3
	7.22 115.9
	7.25 136.2
唐山地震后	7.30 140.8
	8.6 146.1
	8.10 131.1
	8.15 127.2

表 3 井压的短期变化

时 间 (年. 月. 日)	1号井井口压力 (油层深度 16075±12 米)	2号井地层压力(at) (测量深度 2700 米)
唐山地震前	1976.5.24	182.2
	5.28	190.9
	6.28	200.4
	7.1	25.2 (at)
	7.5	24.0
	7.10	24.0
	7.15	28.5
	7.20	37.2
	7.25	40.3
余震频发时期	7.30	48.5
	8.5	51.5
	8.10	50.0
	8.12	
	8.15	51.0
	8.20	48.8
	8.25	49.0
	9.1	47.0
	9.5	43.5
	9.21	
	9.23	203.0
	10.19	200.3
		205.0



(a)



(b)

图 6 地层压力曲线

(a)——板 15 和庄 9-13 井 (b)——义 47 井

2. 震前几十天的短期异常

1976年5—6月份在上述异常变化背景上又发生进一步变化。图5中的8号井产量5月份较4月份上升约5倍，异常持续约两个月。

11号井与8号井变化基本一致。位于渤海湾腹地的3号井产量表现为下降(详见表2)。

在此期间一些非开采的暂闭井也发生喷油事件，从宏观方面反映了深部岩层中压力迅速增大。例如4号井于6月16日喷油，此后又断续喷油两次，直到发生唐山地震。

地层压力的短期变化也非常典型，以图6中的曲线为代表，压力上升从5—6月开始，一直持续到大震后一段时间才逐渐下降。压力数据在表3中给出。2号井地层压力由5月24日的182.2个大气压，至8月12日上升到219个大气压，然后缓慢下降，约在3个月内上升37个大气压。1号井井口压力则从7月初至8月初上升了26个大气压。

压力曲线的共同特征是几乎在上升到最高值时发生大震和频繁的余震。

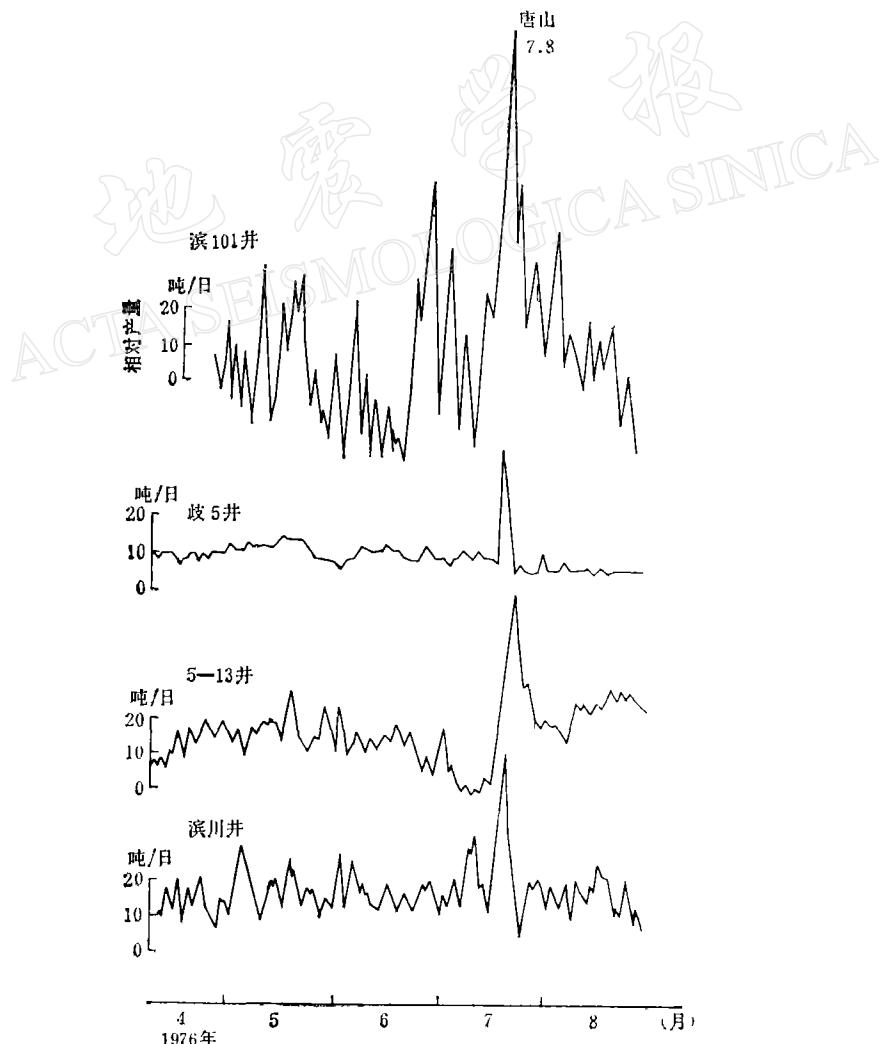


图7 油产量的临震异常

四、震前几天的突变式异常

表现为临震前几天(一般为5—10天左右)在产量曲线上出现一个显著的尖形脉冲。图7的四口井产量曲线可作为典型代表。这种异常形态比较普遍,由于异常时间集中,幅度较大,容易识别,人工驱动的井孔也显示得很清楚。

五、几点讨论

1. 油井压裂曲线与花岗岩三轴压裂试验曲线相似。证明岩石破裂强度、构造应力与孔隙压力之间联系密切。唐山地震前油井实测的压力变化曲线直接证实了这种关系:震前大范围构造应力增强导致地层孔隙压力增大,进而引起油井动态发生异常变化。震时应力、应变曲线与油井岩层水力压裂过程具有相似的形态(图8),表明油井动态变化确与地震应变有一定的因果关系。

渤海湾及周边各油田区为中新生代以来的稳定拗陷区,现代测量结果,其下降速率在边缘为3—8毫米/年。这个地区长期以来受引张应力作用。当区域应力场增强时,这个地区的断裂抗剪强度降低,但不发生地震,而是发生较强的蠕滑,引起含油层孔隙压力和

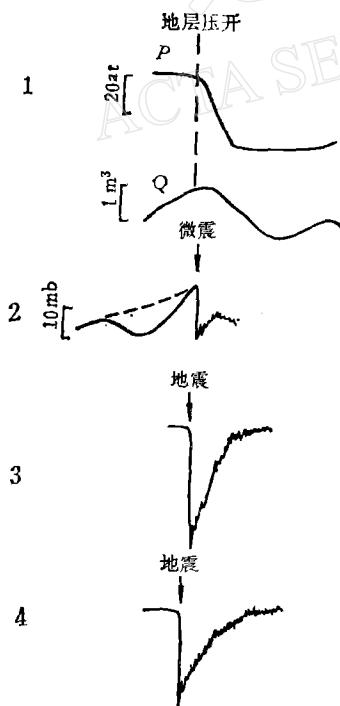


图8 水力压裂与地震破裂过程比较

- 1.油井压裂
- 2.北犹它地应力观测(据 H. S. Swolfs)
- 3.1961年8月19日纳那应变仪记录
- 4.1977年7月10日唐山5.1级地震时水位自记曲线

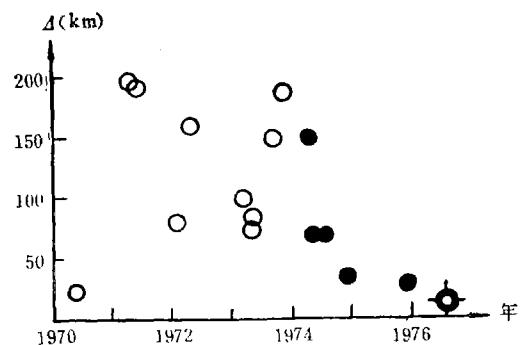


图9 1970—1975年唐山主断层附近的地震活动($M_L \geq 4$)

空心圆 1970—1973
实心圆 1974—1975

渗透系数改变,促使动态发生异常波动。因此这些油田本身地震活动性很弱,但其动态又能灵敏地反应某些地震准备过程。油井异常中的上升和下降的差异则可以解释为由断层蠕动传播方向与井孔位置的相反分布造成的,例如井孔位置在传播前进的前端则孔隙压力上升,油产量也上升。若井孔在蠕动传播前进的后方,产量与压力就下降。

总的来说,渤海湾各油田的异常是在唐山大地震前约两年开始的,恰好就是在这时唐山震源区附近小震活动($M_L \geq 4$)激增,例如1974年5月7日在昌黎附近的4.8级地震及12月15日宁河4.6级地震,标志着震源区局部微小破裂加速增长并日益趋近主断层,由图9可看出,1974年后小震从外围向唐山地震断层集中迁移。显然标志着应力场发生了某种重要变化。

2. 井压实测数据表明震前约一个月,地层压力急剧上升约20—50个大气压,这个增量与近场记录和远场记录波谱分析的唐山大震应力降(8—30巴左右)很接近,也与板内大震平均应力降(10—100巴)很接近。可能说明油井压力变化与震源释放的应力有一定关系。

3. 在利用油气井动态进行震前观测时,存在着一个突出的人工影响问题。靠天然驱动的油井显示了清楚的震前信息,但这类井孔只占井孔总数的百分之几。这样固然使我们不必大量处理数以千计的井孔资料,而只择少数天然驱动井资料,节省工作量。但也有不利的一面,其一是可使用的资料大大受到限制,不能充分利用,从统计学意义上讲,这对震前信息和预报的可信度会产生极为不利的影响;其二是天然驱动井孔不断地演变为人工驱动井,质量高的观测资料都会中断,不能保持资料的连续性。

由于以上原因,在使用油田动态资料进行震前现象分析时,不能仅局限于少数井孔,而应以少量天然驱动井资料为主,同时注意大量的一般井孔动态。这类井孔存在两种干扰:一是单井人工影响或其他偶然因素;二是整体性人工影响(如油田全面注水等)。第一种干扰在时间上是无规律分布的,可视为随机事件,采用简单的叠加处理就有可能突出与地震有关的变化。例如图10显示的渤海西岸枣园油田全部井孔1972—1980年平均产量变化,可见1975—1976年出现峰值,与唐山地震相关。这些井孔绝大多数为人工驱动,这说明对井孔进行适当的数学处理仍是有参考价值的。对整体性人工影响可以通过相关计算等方法消除。总之目前的工作着重于选择干扰少的井孔资料做典型,这对于震例积累经验是必要的,今后的课题应是研究尽可能扩大资料范围的途径。

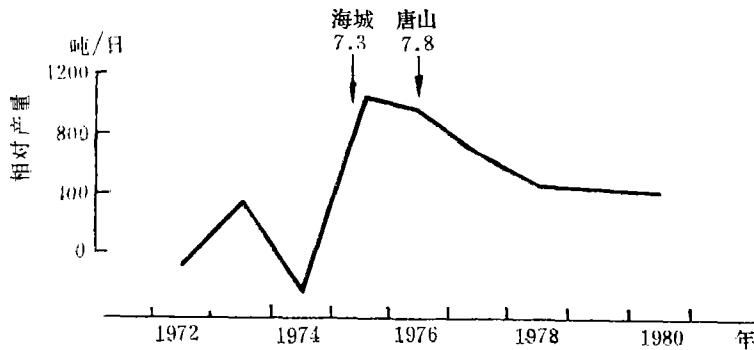


图 10 枣园油田平均日产量变化

本文蒙顾功叙教授审阅和修改,谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] 吴振林、佟武、刘安建、邹泉生、张德元,渤海湾地区油、水井异常与地震的关系,石油学报,1, 1.
- [2] 刘元生、邹泉生等,油井产量的临震变化,地震战线,2, 1980.
- [3] 张德元等,W-11井喷油与唐山地震,唐山地震考察与研究,128—129,地震出版社,1981.
- [4] 李方全,谈谈水压致裂法,地震战线,6, 1980.
- [5] 陈家庚、曹新玲、李自强,水力压裂法测定华北地下深部应力,地震学报,4, 4, 1982.

ANOMALOUS VARIATIONS IN OIL WELLS DISTRIBUTED IN THE BOHAI BAY OIL FIELD BEFORE AND AFTER THE TANGSHAN EARTHQUAKE OF 1976

ZHANG DEYUAN

(Dagang Oil Field)

ZHAO GENMO

(Tianjin Seismological Bureau)

Abstract

In this paper, the authors collect and analyse all available data from oil wells in the Bohai Bay Oil Fields before and after the Tangshan Earthquake from 1970 to 1980. They show certain anomalous phenomena as follows:

(1) The data reveal that the oil production in wells is apparently influenced by the development and occurrence of earthquakes.

(2) The anomalous variations consist mainly in the quantity of oil production and pressure in wells before the Tangshan Earthquake.

(3) The curve of pressure variation measured at the casing head is similar to that by the method of hydraulic fracturing before and after fracturing of rocks.

(4) The anomalous variations before the Tangshan Earthquake in natural oil producing wells, not yet influenced by man-made effects, show rather clearly. But such wells are very few in number and sooner or later will be turned to artificially driven ones, and become complicated.