

# 陶庄矿山诱发塌陷地震对承压井水位的影响

张昭栋<sup>1)</sup> 郑金涵<sup>2)</sup> 靖继才<sup>1)</sup> 张广城<sup>3)</sup>

P3159

**提要** 试用弹性理论和地下流体动力学分析了陶庄矿山诱发塌陷地震对承压井水位的影响, 分析了井水位变化与塌陷地震震级及塌陷点距水井距离之间的关系。通过对塌陷地震序列的分析, 给出了较大塌陷地震前小塌陷地震增多的可能“前兆”。

**关键词** 矿山诱发地震 塌陷地震 承压井 弹性理论 地震序列。

地下流体

## 一、前言

矿井下的开采有时可诱发塌方和煤炮, 产生矿井采区的塌陷地震, 这类地震是人工诱发地震的一种类型。尽管塌陷地震的震级一般不大, 国内很少超过6级, 在国外最大也只有5级多。但由于这些塌陷地震发生在人烟稠密的工矿地区, 而且震源深度较浅, 所以震中烈度有时可达Ⅷ度, 对地面的破坏不容忽视, 尤其对矿井的生产和井下人员的安全造成很大威胁。例如, 1982年1月19日山东省陶庄煤矿发生了一次特大塌方, 整个矿区楼房摆动, 人员明显有感, 波及山东南部半个省的面积, 有十几个地震台清晰的记录到这次塌陷地震, 震级达 $M_L 3.2$ 级。

矿井塌陷地震时的冲击力能使附近的承压含水层产生冲击性的形变, 从而影响到含水层内井水位发生相应的变化, 例如上述的那次矿井塌陷地震时, 鲁15井水位突然下降46.2cm, 而后又渐渐恢复。鲁15井自1979年12月观测以来, 记录到几十次矿井塌陷地震引起的变化。我们利用弹性力学理论分析了塌陷冲击力对含水层的作用, 结合地下流体动力学理论研究了承压井水位在这种冲击力作用下变化的情况。并通过鲁15井水位对陶庄矿区诱发塌陷地震响应的序列分析, 给出了较大塌陷地震前较小塌陷地震增多的前兆特点, 由此可能预测较大塌陷地震的发生。

## 二、矿井塌陷地震概况

矿井由于开采使岩石及局部地层应力发生变化。煤层逐渐采空后, 如果采空区上部的岩层比较软弱或破碎, 在采煤的同时岩块便会逐渐塌落, 这样就不会造成煤矿塌陷地震。但是, 如果岩层比较完整时, 煤层采空后并不立即塌落, 而是待悬空岩石面积大到一定的程度后才塌落, 便造成了煤矿塌陷地震。此类地震系由人们的采矿活动诱发的。

陶庄矿区北部200m左右有一北山断层, 走向NEE—SWW、倾角 $65^\circ$ , 落差在2000m以

1) 山东省地震局, 济南;

2) 国家地震局地球物理研究所, 北京;

3) 山东省地质矿产局, 济南。

上，正断层上盘为石炭二叠纪的煤系层。矿区地质构造复杂，断层较多，在煤层中有岩浆岩入侵。煤层顶板为中粒石英砂岩，厚度40—57m，岩性坚硬，不易冒落。因此容易发生较大的塌方。自1979年12月到1983年12月在矿区的东北部就发生大于1.4级（ $M_L$ ，下同）的塌陷地震23次，其中最大的一次即在前面提到的那次3.2级塌陷地震（表1）。

表1 陶庄矿区东北部塌陷地震及鲁15井水位变化  
Tab. 1 Collapse earthquakes and variations of water level in the Well Lu—15.

编号	发震时间					震级 $M_L$	井水位变化 mm
	年	月	日	时	分		
1	1980	9	11	13	49	1.4	60
2	"	10	14	11	4	1.4	80
3	"	11	5	14	34	1.5	100
4	"	11	9	12	15	1.4	70
5	1981	3	12	1	19	1.4	12
6	"	3	26	1	50	1.6	36
7	"	4	3	17	5	1.9	9
8	"	4	5	14	42	2.0	30
9	"	6	22	1	45	1.5	19
10	"	7	15	10	50	1.6	14
11	"	8	26	1	18	1.6	<5
12	"	10	23	21	23	1.6	9
13	"	11	3	22	2	1.6	7
14	"	11	22	5	20	1.6	22
15	"	12	9	23	34	1.6	22
16	"	12	21	3	23	1.6	24
17	1982	1	5	6	22	1.5	9
18	"	1	5	20	42	1.4	6
19	"	1	6	23	39	1.8	27
20	"	1	7	10	31	2.7	435
21	"	1	19	18	20	3.2	462
22	"	1	23	0	36	1.6	19
23	"	2	14	13	56	1.5	16

### 三、塌陷地震引起承压井水位变化情况

在陶庄矿区发生塌陷地震区的东北300m左右,有一口承压井,即鲁15井。该井地处北山断层南侧, F37断层的西盘(图1)。该井钻深501.61m, 直径108mm的套管下至239.63m。

鲁15井的含水层为二叠纪砂岩, 含水层顶板埋深239.63m, 揭露厚度181.37m。该井水位对地球的固体潮有明显的反映, 日潮差达120mm, 井水位气压系数约为3.1mm/hPa。

鲁15井的含水层下面, 距地面约600—900mm深处有两层煤层。由于承压含水层对所受的应力应变反映灵敏<sup>[1]</sup>, 所以该井不但对固体潮和气压有明显的反映<sup>[2,3]</sup>, 而且对附近的矿层塌方引起的塌陷地震也有明显的反映(图2)。表1也列出各次塌陷地震引起鲁15井水

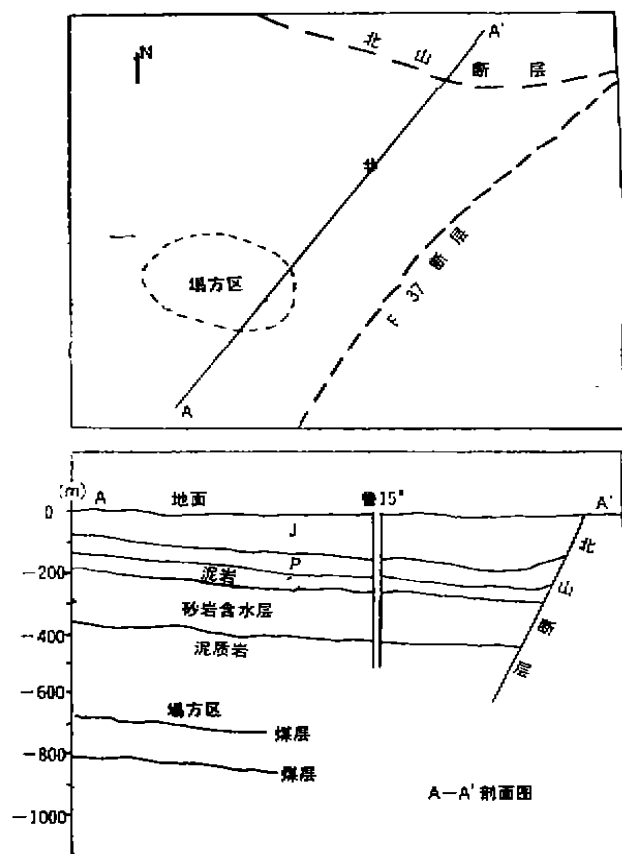


图1. 鲁15井位置及A—A'剖面示意图

Fig. 1 The site of the well Lu 15 and A—A' section

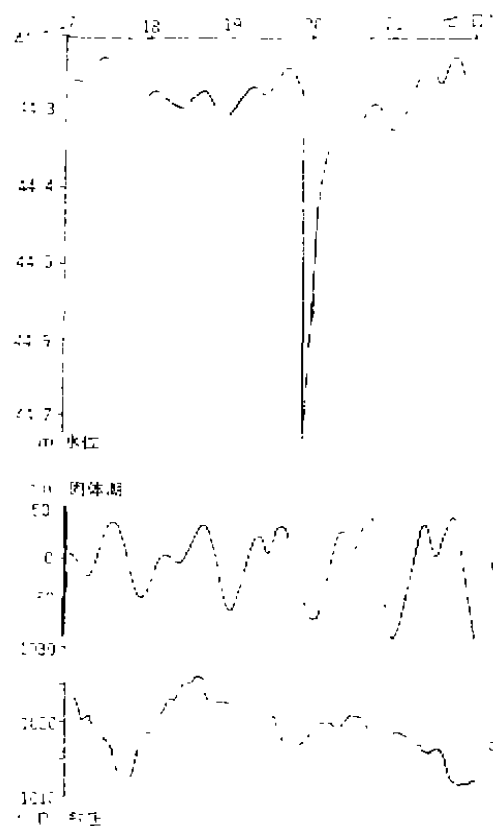


图2 1982. 01. 19, 陶庄矿塌陷地震对鲁15井水位的影响

a. 水位变化; p. 固体潮理论值; c. 气压变化

Fig. 2 The effect of the collapsed earthquake on the water level in the Well Lu—15.

a. Water level, b. Theoretic value of earth tide, c. Barometric pressure

位变化的情况。其中水位变化数值是经过固体潮和气压影响改正后的值。改正的方法是先在不干扰的平静时段，用多元回归求出井水位的固体潮系数和气压系数，然后，再对观测水位值进行改正。

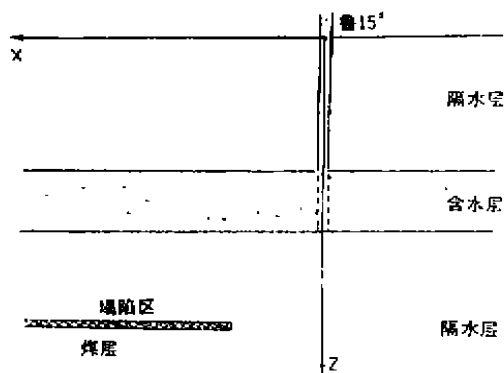


图3. 承压井含水层模式

Fig. 3 The aquifer model of the pressure well.

## 四、讨 论

### 1. 塌陷地震影响承压井水位的模式

将水井含水层系统理想化为水平层状无限大承压含水层。设各层在力学性质上都是均匀的完全弹性介质，含水层在水力学性质上是各向同性的多孔介质。以井孔中心轴和地面建立坐标系，X轴沿图1中的A—A'走向（图3）。并设水井是一口完整井，井孔与含水层之间水可自由渗流。

### 2. 含水层在垂直向应力作用下水头的变化

当上述理想含水层垂直向应力发生变化时，根据弹性理论和质量守恒定律可得

$$\left. \begin{aligned} \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta n}{n_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) &= 1 \\ \Delta V/V_0 &= [(1-n)\alpha + n\beta] \Delta \sigma_z \\ \frac{\Delta \rho}{\rho_0} &= \frac{\Delta n}{n_0} = \beta \Delta P_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中V为受应力变化后被压缩范围含水层的体积，n为孔隙度，P为含水层内水的密度， $\sigma_z$ 为垂直向应力， $\alpha$ 为含水层固体骨架的体压缩系数， $\beta$ 为水的压缩系数，下标零为压缩前的初始值。

由此可得压水层内压力水头的变化为<sup>(4)</sup>

$$\Delta H_0 = - \frac{(1-n)\alpha + n\beta}{2\beta\gamma} \cdot \Delta \sigma_z \quad (2)$$

其中 $\gamma$ 为含水层内水的比重。

由式(2)表明，含水层垂直向应力发生变化后，可引起含水层内压力水头发生变化。这一变化与水井含水层的参数有关。当这些参数不变时，与含水层垂直向应力变化量成正比。

### 3. 矿井塌方冲击力引起含水层的应力变化

鲁15井含水层在煤层的上方，当煤层产生塌方时，使含水层受到一个向下的冲击力。由弹性力学理论可知，对于一个半空间体，体力不计，在其边界面上受到一个法向集中力时，介质中相应产生一个应力变化，其垂直向应力变化为<sup>(5)</sup>

$$\Delta \sigma_z = - \frac{3Q}{2\pi} \frac{Z^3}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (3)$$

其中Q为集中力。

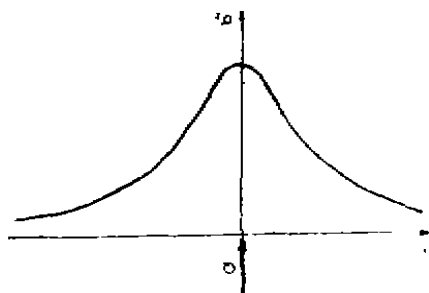


图4. 介质中的应力分布  
Fig. 4. Stress distribution in the medium.

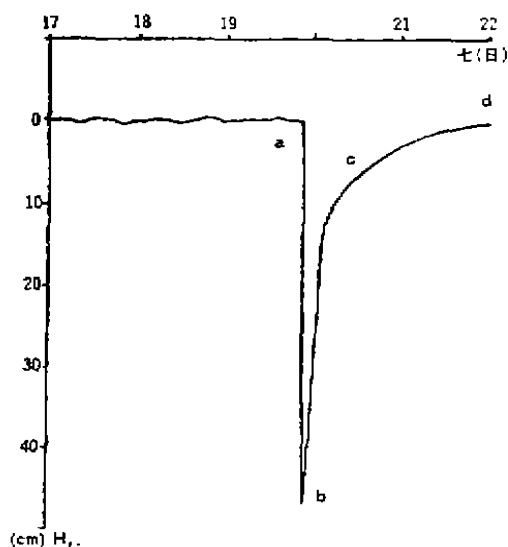


图5. 固体潮和气压改正后的水位  
Fig. 5. the water level corrected by earth tide and barometric pressure.

位降深与时间的平方成反比, 即井水位恢复相当快。这相当于图5中b→c的过程。

当t值足够大时, 式(4)中右边的第一项占主导地位, 它表明恢复井水位与时间的对数成线性关系, 此后井水位恢复得较慢, 这相当于图5中c→d的过程。随着时间的加长, 井水位慢慢升高, 逐渐恢复到受冲击之前的水平。鲁一15井水位在这次塌方冲击后, 几十天才恢复到原水平。

#### 5. 影响井水位变化量值的因素

初看起来, 矿井塌陷地震的震级越大, 对含水层产生的冲击力越大, 那么井水位的变化也应越大。但表1中列出的震级与井水位变化量之间, 并没有简单的线性关系。而是在同样

由式(3)可知, 介质中所产生的垂直向应力变化与离开集中力的距离有关, 而且衰减得很快(图4)。

#### 4. 井水位变化的回复

1982年1月19日的一次大塌方, 引起鲁15井水位突然下降, 而后又渐渐恢复。把当时的观测曲线(图2)经固体潮和气压影响改正后得出图5。

从图5可以清楚的看到, 在矿井塌陷的同时, 鲁15井水位产生了突然下降。这是由于塌陷时产生一个冲击力, 此作用力通过煤层与含水层底板之间的不透水层, 作用到含水层, 使含水层产生一个类似图4那样的应力变化, 引起含水层压力水头发生突然变化, 致使井水位下降(图5中的a→b)。

塌方产生的冲击力作用时间很短, 而后井水位又渐渐上升, 这是井水位的恢复过程(图5中b→c→d)。由地下流体动力理论可知, 井水位恢复过程的水位降深近似满足下式<sup>[4]</sup>

$$s_w = \frac{2.303q}{4\pi KM} \log_{10} \frac{t-t_0}{t-t_1} - \frac{r_w^2 s_q(t_1-t_0)}{16\pi K^2 M^2 (t-t_0)(t-t_1)} \quad (4)$$

其中q为在冲击力作用下井水位变化流量, K为含水层的渗透系数, M为含水层厚度, t为时间, t₀和t₁分别为冲击力开始和结束的时刻, r\_w为井孔半径, S为含水层的贮水系数。

当t值较小时, 即井水位恢复的初期, 式(4)中右边的第二项占主导地位, 它表明水

的震级下井水位变化有时相差几倍。可见影响井水位变化量值大小的因素并不只是震级一种。

由公式(3)可知,在一个集中面力的作用下,介质中垂直向应力的分布很不均匀,而是随作用距离的增加而迅速衰减。例如,当深度一定时,即 $Z$ 为常数,介质中垂直向应力随作用距离的增加而以距离的5次幂迅速衰减。以图3所示的情况,塌方煤层距含水层底板约300m,塌方煤区距鲁15井水平距离为200m—400m,对于同一震级的塌方,如果产生的冲击力 $Q$ 的大小一样。利用公式(3)可以得出,当水平距离为200m时, $\Delta\sigma_z = -0.0212Q$ ,当水平距离为400m时, $\Delta\sigma_z = -0.0041Q$ ,两者相差5.1倍。可见煤区塌方点到鲁15井的水平距离对井水位变化量值的影响相当大。

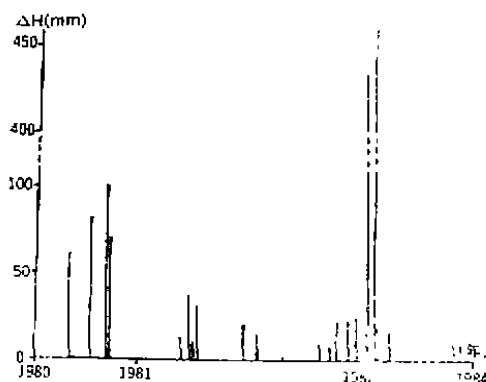


图.  $\Delta H-t$ 图

Fig. 6 Map of  $\Delta H-t$

由此我们总结出如下结论:

①当煤区塌方点到鲁15井的水平距离一定时,震级越大的塌方引起鲁15井水位变化越大。

②当矿井塌陷地震的震级一定时,塌方点到水井的水平距离越近,则引起井水位的变化也越大,而且随此距离的5次幂迅速增大。

## 6. 发生较大塌陷地震前井水位变化的“前兆”

根据表1给出的鲁15井在发生塌陷地震时井水位的变化情况,利用类似于测震学的某些分析方法,可以对发生较大塌陷地震前井水位变化的“前兆”进行初步分析。

第一,以鲁15井水位对矿井塌陷响应前变化为纵坐标,以时间为横坐标,可得到 $\Delta H-t$ 图(图6)。

从图6可以看出,自1979年12月到1983年12月矿井塌陷地震活动经过几次“平静—活动”的反复过程。从1979年12月开始到1980年9月10日鲁15井水位没有出现塌陷地震产生的变化,这是第一个平静期。1980年9月11日到11月9日井水位出现4次塌陷地震变化,这是第一个活动期。在这次活动期里相邻两次井水位变化的时间间隔有越来越短的趋势。1980年11月10日到1981年3月11日没有出现塌陷地震的井水位变化。这是第二个平静期。1981年3月12日到同年的4月5日记录到4次塌陷地震的井水位变化,这是第二个活动期。1981年4月6日到6月21日没有记录到水位变化,这是第三个平静期。从同年的6月22日到8月26日记录到3次井水位变化,这是第三个活动期。从1981年8月27日到10月22日没有记录到井水位变化,这是第四个平静期。1981年10月23日到1982年2月14日记录到井水位变化12次,其中有两次井水位较大变化,超过了400mm。把这—个活动期分成震前活动期(从1981年10月23日到1982年1月6日)和震时活动期(1月7日到2月14日)。震前活动期有8次井水位变化,震时活动期有4次井水位变化。由以上分析可见,在两次较大塌陷地震发生之前,小塌陷的水位变化经历了次4“平静—活动”交替出现;较大塌陷前小的塌陷活动明显增多。从各个活动期持续的时间来看,出现了由长到短再到长,然后产生较大塌陷。从各平静期持续的时间来看,由长逐渐缩短,而后产生较大的塌陷。

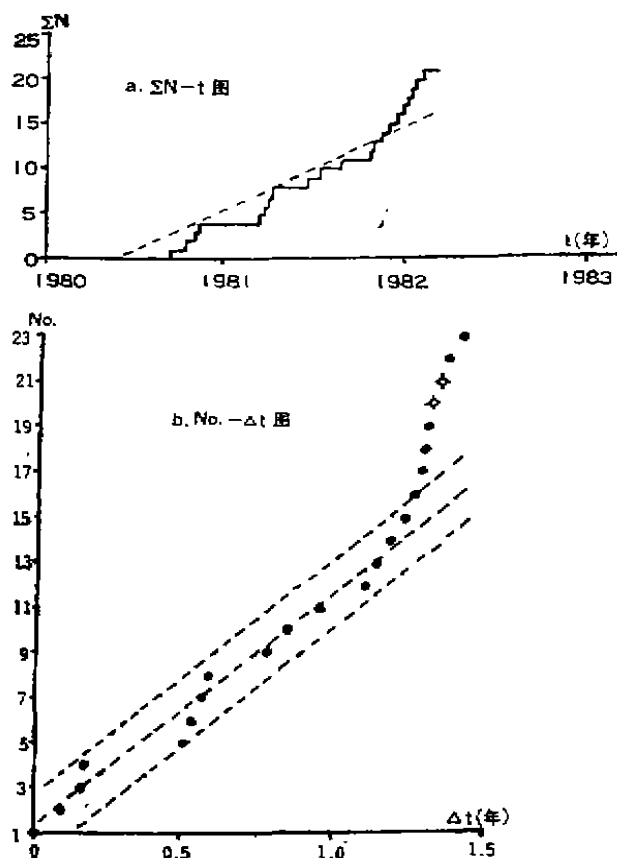


图 7.  $\Sigma N-t$  和  $No-\Delta t$  图

Fig. 7 Map of  $\Sigma N-t$  and  $No-\Delta t$

第二, 以鲁15井水位记录的塌陷地震变化次数的累计  $\Sigma N$  为纵坐标, 以时间为横坐标, 可以得到图 7—*a*。从图的曲线可看出, 在前 3 个“平静—活动”期时段里,  $\Sigma N-t$  曲线总的变化不大, 平均每年有 10 次左右的井水位变化。从第四个活动期开始曲线的斜率迅速上升, 进而明显地偏离了正常范围, 这段时间内平均每年将记录到 30 次水位变化。使我们感兴趣的是, 产生这一变化开始的时间是在较大塌陷发生前的 28 天, 在 12 月 21 日开始曲线急速上升, 超出了正常变化的上限虚线 (图 7—*a*)。

第三, 以井水位变化的序号  $No$ 。为纵坐标以相邻两次变化之间的时间间隔为横坐标, 可以得到  $No-\Delta t$  图 (图 7—*b*)。利用最小二乘法可以画出正常活动拟合直线及两条二倍中误差偏离线。在正常情况下, 曲线各点均落在两条偏离线之间。在较大塌陷前 28 天开始, 小的塌陷水位变化点冲出了偏离线的上限, 3 次小的塌陷后, 产生了较大塌陷。

如果以上三点分析是一个规律的话, 我们有可能根据井水位变化的这些“前兆”现象, 预测未来较大塌陷的发生。

## 五、结 语

矿井塌陷地震对附近的承压井水位有一定的影响。这是因为矿井塌陷时的冲击力使承压含水层受到的应力发生变化, 此变化又改变承压含水层的压力水头, 致使井水位发生变化。这种井水位变化的量值与塌陷地震震级和塌陷地点距水井的距离有关; 塌陷地震震级越大, 引起井水位变化越大; 塌陷地点距水井的水平距离越近, 井水位变化越大; 而且以此距离的 5 次幂指数增大。较大塌陷前较小塌陷次数明显增多, 而且可在较大塌陷前一个月出现异常。据此有可能对较大塌陷进行预报。

感谢山东省枣庄矿务局、陶庄煤矿地震台、枣庄市薛城区科委和枣庄市地震办公室为我们提供了有关资料及协助我们进行考查。

## 参 考 文 献

- (1) 张昭栋等著, 地下水潮汐分析, 山东大学出版社, 1988。

- 〔2〕张昭栋等, 中国地下水位潮汐的观测研究和分析, 地震学报, 1989, 11, ( 4 ), 392—401.  
〔3〕张昭栋等, 承压井水位对气压动态过程的响应, 地球物理学报, 1989, 32, ( 5 ), 539—549.  
〔4〕王六桥等, 大震前地下水喷涌型前兆异常的物理机制, 地球物理学报, 1982, 25, ( 7 ), 611—621.  
〔5〕徐芝纶, 弹性力学, 人民教育出版社, 1978.

## EFFECT OF THE COLLAPSED EARTHQUAKE INDUCED IN THE MINE OF TAOZHANG AT THE WATER LEVEL OF PRESSURE WELL

Zhang Zhaodong<sup>1)</sup> Zhen Jinhan<sup>2)</sup> Jing Jicai<sup>1)</sup> and Zhang Guangcheng<sup>3)</sup>

〔Abstract〕 In this paper, the effect of collapsed earthquake induced in the mine of Taozhuang at the water level in the pressure well is analysed on the basis of elastic theory and dynamics of ground fluid. The relationships between the variation of well water, magnitude of the collapsed earthquake and the distance between the collapse spot and the well is discussed. A probable "precursor", small collapsing earthquakes which will be increased before the bigger one is given by the means of analysing the sequences of the collapse earthquake.

〔Key words〕 Induced earthquake in mine; Collapsed earthquake; Pressure well; Elastic theory; Earthquake sequence

---

1 ) Seismological Bureau of Shandong Province

2 ) Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing

3 ) Geological and Mineral Bureau of Shandong Province, Jinan