

# 某些短临异常的浅层机制

王六桥 李善因

(新疆维吾尔自治区地震局)

## 前 言

近些年来,我国南北地震带及其东部地区,频繁地发生着强地震,特别是海城、唐山、松潘三次七级以上大震,给我们提供了丰富的前兆资料和宝贵的经验教训。我们必须加速认识上的深化过程,找出孕震的内在规律,尽快实现地震预报。作者在工作〔1〕中,曾根据临震前井群异常的时、空分布特点,给出孕震短、临阶段地下应力调整、集中的图案,即:

“孕震的过程,就是受力块体上断裂群应力调整、集中的过程,是以断裂为通道,以蠕动和前震作为调整方式,逐渐将应力集中到断裂群中未来发生地震的断层之“主闭锁段”上或新的破裂段上,直至它们发生破裂——地震为止的过程”。它包含如下含意:(1)构造应力是孕震的驱动力;(2)孕震时应力的调整和集中是在大范围内发生的;(3)应力的调整和集中是沿块体内的特殊格架——断裂系上进行的;(4)调整的方式是蠕动和前震;(5)通过在块体某些局部点的应力释放而造成应力在块体另外一些点在空间上和强度上的集中,来实现应力的调整,最后导致了在“主闭锁段”上或即将发生的新破裂段上的应力集中,在强度上逐渐接近于岩体的破裂强度。越接近于岩层的破裂,这个调整、集中的过程越加速,震源体就变得更不稳定。

在海城、唐山大震前,均观测到了地应力值的大幅度跳动,地应力仪指针以不同的周期做大幅度摆动,还观察到了井水水位在几小时内的往复起落现象,说明震源体已处于很不稳定状态。这种地下应力的脉冲式异常,其周期为几天、几小时、几分钟到更高的频率。必须指出,这种脉动式地应力变化,会促使地下岩体中的孔隙压力升高以及层间气的压力升高〔10〕,从而使岩体中的孔隙压力达到“破裂压力”值,为“液压破裂”现象提供了力学条件。

## 地下应力变化所造成的“液压破裂”现象

在唐山地震前1—4个月,常观测到震中区附近的油井自喷现象,尤其值得注意的是一些几千米深的无油无水的干井临震前自喷〔1〕。在临震前几天,还可在震中区观测到大量机井、民用井井水上涌现象〔1〕。这种油、水井的水(油)位上升幅度很大,多则数千米,少则几十米,变化急剧,常伴随着巨大声响,这种水位的变化,有别于先长时间下降、尔后再回跳的那种水位变化类型,我们称后者为I型,前者为II型。在I型变化中,回跳时水位的突升幅度不大,一般比正常水位多则高1—2米,一般仅几十厘米,其机制用一般的渗流力学原理即可解释。II型变化则是一种地下的“液压破裂”现象,对于油井自喷,则是地下应

力积累达到一定程度时,使得地下储油构造“圈闭体”内的孔隙压力达到“破裂压力”值,石油压裂围岩,沿油井喷出地面所致。临震前几天震中区井群井水上涌可解释为,在临震前地下应力或者是增加很快,或者是以脉冲形式而增加,使得即使是“非圈闭体”的水系,其内流体也来不及排出,由于岩石受压孔隙率减小,也不利于流体排出,致使孔隙压力升高,达到破裂压力值,水沿裂缝经井筒喷溢而出。总之,只要存在着适当的将构造应力转化为孔隙压力的条件(或者是储水体的封闭性,或者是构造应力的作用方式),当地震前地下应力增加时,就会出现“液压破裂”现象,如果又有通往地表的通道(深井、岩隙、断裂),这种现象就可以被我们观察到。“液压破裂”亦称水力致裂,在矿山开采、石油开采中广为应用,利用在钻孔中产生“水力破裂”还可以求得构造应力<sup>[2]</sup>。石油开采发生井喷时,常常在无油地层也有石油流出,石油工人称这种地下液压破裂现象为“串层”。

在地下岩层中会不会产生“液压破裂”现象呢?有人指出,在地下某一深度上,如果岩石中的孔隙压力达到该深度静水压力(上覆岩层重量)的0.85,则就会出现“液压破裂”现象<sup>[4]</sup>。“当水的压力很高,接近于覆盖层的重量时,在自然条件下,能在很深的地方发生张力裂缝”<sup>[5]</sup>。有人指出:“如果含水层与地表水供给区及河流有着水力学上的联系,则含水层的孔隙压力与地质静压力的比值 $\lambda$ 为0.43—0.48,不能向周围流通的深层地下水,常常经受着地质静压力或构造应力的作用。这时上述 $\lambda$ 值可能近于1或超过1。根据钻井资料,在1—4公里的深度,已经遇到了近于1的 $\lambda$ 值。有足够的根据认为,在更深的地方有这样高的 $\lambda$ 值已成为规律”<sup>[5]</sup>。

由于 $\lambda$ 值有随深度增加的趋势,因而小的应力扰动就会激发液压破裂现象出现,估计在地下深部这种现象比浅部发生的频繁,只不过由于压裂缝扩展有限,又不具备上升通道,这种现象在地表不易被看到。但是可以肯定,液压破裂发生,深部水会由压裂缝在孔隙压力作用下而上升。日本松代震群伴随有大量地下水涌出,液压破裂恐怕是提供上升通道的机制。

地震前地下应力的增长,伴随着地下的液压破裂现象出现,给地下水、气开创了运移条件,正是由于地下水的参予,从而导演了一幕幕生动壮观的短临前兆异常现象。

### 地下水的短临前兆异常

在海城、唐山地震总结中,指出八种地下水异常现象,不包括水化学异常。八种异常中,地下水的上升异常是主要的,液压破裂造成的上升异常,从地下深部携带出大量信息,主导和派生了其它异常。

水氡与水化学状态的变化:地震前微裂隙发育,矿物晶格破坏时水中氡含量丰富,由于“液压破裂”现象,深层水由压开的裂缝上溢,使得含镭岩石的射气系数K大大增加,而水中含氡浓度恰与K成正比,地震后应力解除,裂缝闭合,一切复原。地震前震中区地下水化学状态的破坏应与震源区压力升高时在物理化学过程的作用下地下水溶解能力的变化相联系,在液压破裂现象发生,裂缝扩展时,又与不同水层的水混合有关<sup>[12]</sup>。

### 动物异常

震前动物异常,可能是动物生理上不适应或惊恐的反应,是无法加以模拟的。如果能够查明引起惊恐的原因,那就可以找出使动物异常的某种信号以及这种信号发生刺激作用的临界值。根据文献<sup>[6,7]</sup>,我们将唐山地震动物异常先兆时间进行了统计比较。唐山地震动

物异常一百例中提供了107个数据，前兆时间 $T$ 取 $\log_{10}T$ ， $T$ 为发现动物异常到地震发生的时间，以天作单位，取 $\log_{10}T$ 的0.5级的频度分布(图1)。同理，我们取得唐山地震地电、地应力、土应力、地形变、水氡、地磁、地下水宏观异常等地球物理异常先兆时间870个(其中包括地下水宏观异常640个)，求得 $\log T$ 的0.5级频度分布(图2)。图2中打斜线的直方图部分为地下水异常先兆时间的频度，如果不考虑这一部分，则图1、图2很接近于Weibull分布。图1中 $\log_{10}T = -0.5$ 处及图2中 $\log_{10}T = 1.5$ 处频度最大，这说明动物异常峰值发生在震前1天左右，而地球物理异常峰值发生在震前一个月(不包括地下水异常)，属于宏观异常的地下水异常峰值多发生在震前1—3天。这种现象在海城地震、松平地震时也是如此，在其它震例中也多有此报导。这里说明两个问题：①引起动物异常的原因与引起各种地球物理异常的原因无关；②动物异常与宏观地下水异常具有同时性、同地性，它们之间存在着某种联系，地下水异常略早于动物异常。我们解释如下：

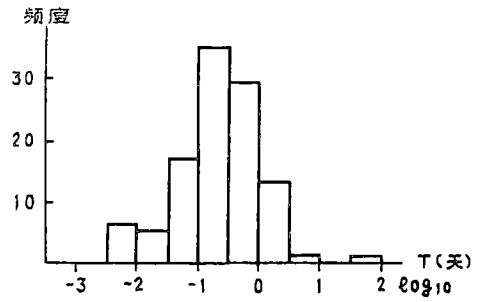


图1 唐山地震动物异常发生频度随时间的变化

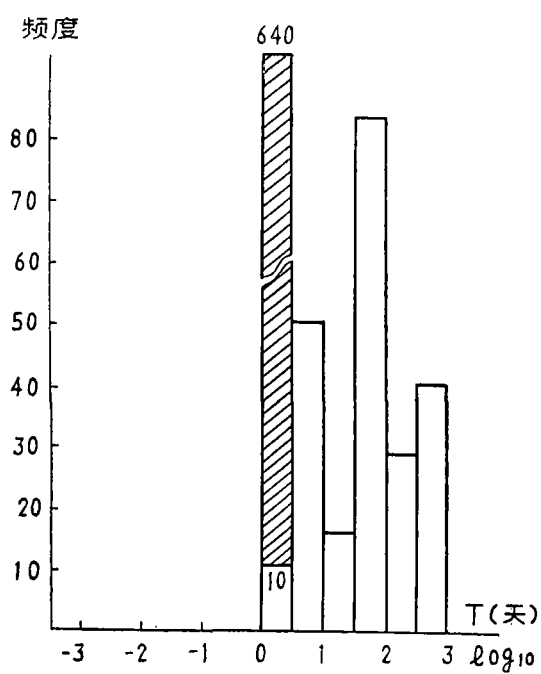


图2 唐山地震前地球物理异常发生频度随时间的变化

地电场变化〔7〕，有人认为前者是一些动物惊恐的原因〔6〕，而后者是鲶鱼异常的原因〔11〕，而电场大幅度的缓慢变化，对鲶鱼没什么影响。

(iii) “液压破裂造成深部气、水的上逸，如松平地震前一些有毒、有味或二氧化碳浓度很高的不常见气体上逸，气、液上涌引起土壤温度、湿度的变化都会引起穴居动物的逃离。

(i) 地学生物学指出〔9〕，“整个地面都有密网似的电流和磁流穿过，这些电流和磁流交叉的地方形成了一种能损害生物体的强大力量。这种看不见的线交叉点的存在已得到了证明，用仪器能测出其强度。地学生物学指出，动物也觉察到了这种现象，狗、马从不在这些交点的任何一个地方睡觉。但也有一些动物喜爱这些地方，由于尚不了解的原因，这些电磁线的交叉点对猫、蜜蜂和蛇起着一种有益的作用”。但是地震前“液压破裂”现象造成的强大的电磁场，改变了正常的电磁流线分布，使得这些交叉点在空间上、强度上随时间有剧烈地变化，使动物无法适应；

(ii) 液压破裂现象能导致地下及空气中静电的急剧变化，会产生脉冲状

### 地 光、地 磁、地 电 异 常

有人指出<sup>[10]</sup>, 在 $10^3$ 个大气压下(相当于3—4公里深处的陆地静水压力), 地下水流动可产生 $10^4$ — $10^5$ 伏的电位差, 足以引起“光”现象(1965—1968年松代地震观测到的)。当岩石孔隙度为1%时, 每平方公里的电流强度可达3—30安培, 产生2—200伽马的磁场, 此值与松代地震群时测到的一致。显然, 液压破裂现象提供了地下水流动的条件, 这些异常出现的时间均在临震前, 其突发性也很一致。这种情况还用来解释临震前的电磁波扰动。当液体在地下裂缝中因液压破裂而运移时, 其速度比一般过滤速度大大加快, 造成的过滤电场要比平常大几个数量级。此外液压破裂使岩石裂隙充水, 使得未饱和岩石电阻率急速下降。

### 地 气 雾 异 常

应力冲击升高引起层间气压力的突然升高; 岩石微裂及“液压破裂”时产生的超声振动使某些气体富集并加速逸出; 孔隙压力升高而引起的气体溶解度增高, 液压破裂时造成的新的气、液通道等等, 都是气、液运移异常的一些原因<sup>[12]</sup>。由于液体中气体分子运动速度高于溶液本身的运动速度, 因而造成了气体先于液体的逸出, 这就是临震前地气喷出的原因。如果震中区空气湿度很大, 比重较大的地下气体喷出后不易逸散, 常常形成带有异味的雾气。

### 小 震 活 动

有名的丹佛深井注水诱发地震的试验给我们以启发, 注水降低了有效围压, 使岩石破不强度降低。另外, 水降低了断层面上的摩擦力, 使断层更易滑动。松代震群也是一个很好的例子, 震群活动伴随着地下水大量涌出。1970年在松代又向1800米深井进行了注水试验, 结果又诱发了很多小震<sup>[13]</sup>。由地面向下注水会诱发地震, 如果反过来, 水由地下深部向浅部运移, 则必然也会诱发浅部的地震, 这就是松代地震群发生的机制。实际上, 恰恰是液压破裂开辟了水上涌的通道, 地下最易压裂的地方, 莫过于岩石原有的裂隙和断层, 松代震群应起源于深部的液压破裂使水上涌引起其上部断层的活动, 在水的逐渐上涌时, 又诱发了更浅部的地震, 因此松代震群的震源深度应有逐渐变浅的趋势, 实际上松代地震最频发的深度确实以 $0.9 \times 10^{-3}$ 公里/日速度上升<sup>[13]</sup>。

地下深部液压破裂引起小震活动更一般的意义是, 在一次大震前, 由于地下应力是沿一个原有的断裂系中调整的, 可能有很多应力集中点, 对于每一个集中点, 只要存在一定条件, 就有可能发生液压破裂, 而向其邻近断层注水产生地震, 这就是在大震前一个大范围内, 小震活动增高的原因。当然, 这已超出短临异常的范围了。迄今为止, 一切有关地震成因的理论和实验, 都是基于岩石的干破裂, 只有膨胀——扩容理论开始涉猎流体的作用, 但是, 在膨胀——扩容理论中, 流体只扮演了一个被动的角色。而液压破裂机制告诉我们, 地下流体的作用不是被动的, 它也可以使岩石致裂, 也可诱发地震。如果我们称因岩石的干破裂所发生的地震为原生地震, 流体诱发的地震为次生地震, 则在大量的小震活动中寻找原生地震, 可能是识别前震的物理基础。

### 地 形 变 异 常

大震前常伴有地面的隆起, 震后伴有地面沉降。对于松代震群, 地面隆起幅度最大达70

厘米,更有趣的是,从隆起区各地涌出的水量,估计多达  $10^7$  立方米,尔后隆起转为沉降,而沉降的体积大致等于喷出水的总量<sup>[13]</sup>。这再好不过地说明了水的作用。由于地下深度越深,相应的孔隙压力也越大,只是由于岩层的封闭,而不得上涌,长期呈承压状态,但它确实具备向浅层注水的压力。由于蠕动或其它构造原因,使水的压力增大,压破顶板,深部水向浅部注入,造成地面隆起。地震前孕震区应力很集中,出现液压破裂现象,出现深部向浅部注水使地面隆起,产生地形异常就是可以解释的了。我们曾碰到在大城市或工业区因大量抽取地下水而使地面沉陷的例子,而地震前地面的隆起却是它的逆过程。

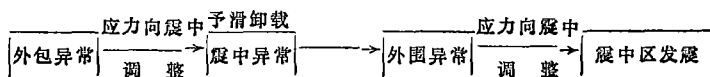
## 结 论

目前的孕震模式,都是认为存在一个源,研究源中可能发生的物理过程,来解释各种前兆现象,认为前兆现象直接受控于源内的过程。作者认为,必须研究具有断裂系块体受力时应力调整的动力学过程,而地震只是这个过程中的一个环节,只有如此才能解释自邢台地震以来华北块体相继发生的一系列大震。作者认为,由孔隙压力升高而产生的液压破裂现象既可能在地下深处(直到不存在储液岩石的深度)发生,又可能在浅部发生(如震前油井自喷所间接观测到的),而很多短临前兆异常的发生,是与浅部的液压破裂现象有关的。

膨胀——扩容模式之所以有很大吸引力,是因为它既考虑了固体受力破裂的规律,又考虑到地下水的作用。但它有两个弱点,一是按照一般渗流力学原理,这么大规模的扩容进水,是不太现实的。其二是水只是被动的进进出出,最多考虑到有效围压与降低断层面摩擦力的问题。而液压破裂机制则认为水在一定条件下能自己开辟通道,参予岩石的破裂过程,例如深部承压的水能通过压裂缝向浅部注水,从而能产生像丹佛深井注水诱发地震的机制,很可能一些与大地震活动关联不大的中、小地震,与这种机制有关。岩石破裂的裂缝应该有两种,一种是构造应力使固体岩石发生的微裂缝,更准确的说是由固体——固体相互作用产生的,这种裂缝称为固体——固体裂缝。还有一种微裂缝则是由液压破裂产生的,称为液体——固体裂缝,这种微裂缝在地震过程中的作用目前还未引起人们的注意。实际的破裂过程可能是二者互相促进交错发生的。

使承压水(油)层孔隙压力急剧上升而达到破裂压力值的机制看来是断层的快速蠕动。一种慢速的断层间歇蠕动引起井水水位变化的野外观测,已在美国霍利斯特附近的圣安德烈斯断层上得到证实。对于另一个极端,即当地震时断层以破裂速度运动而引起的地表冒水现象是大家所熟悉的,这是孔隙压力急速升高的结果。砂土液化就是地表土层液压破裂的结果。

孔隙压力只在达到“破裂压力”值时才会发生“液压破裂”现象,它具有突发性特点,因此它所派生的前兆异常应有突发性和同时、同地性的特点。孔隙压力低于“破裂压力”则裂缝闭合,派生的异常也就停止。当应力沿断裂系向源集中时,异常也就出现了向震中迁移的特点,应力的集中导致了震源断层的予滑,使得未来震中区出现了异常。断层予滑是个卸载效应,又使得应力由外围向源区调整,这样又出现了第二轮的异常由外围向震中迁移的现象,直至发生地震,这就是短临前兆几起几落的原因。如果短临异常的时空变化如下:



则常常使人觉得异常先由外围向震中迁移,在发震前异常又由震中向外围迁移。实际上始终

是应力向震源单向集中的过程。

液压破裂裂缝的扩展是沿最小主应力方向，这就暗示着许多前兆异常的分布可能也有一定的方向性，不过，由于地下岩石有各种原生的断裂和裂缝，这是最易压开的通道，因而使问题复杂化了。由于破裂压力值总是和一定的构造应力相联系的，这就启发我们可以找到划孕震短、临阶段的一个定量的力学标准。

本文仅作为一个思路，很不成熟。对于郭增健同志给予的指导和鼓励作者表示感谢。

1978年6月第一稿 1980年元月第二稿 (80年2月6日收到)

### 参 考 文 献

- [1] Wang Liu-Chao and Li Shan-yin, 1979.  
A study of the phenomena and mechanism of pre-quake stimulation of oil and water wells.  
International Symposium on Earthquake Prediction, Unesco Headquarters, Paris, 2—6 April 1979. Theme I: "Earthquake Precursors."
- [2] Kehle, R.O.: Determination of Tectonic Stresses Through Analysis of Hydraulic Well Fracturing.  
Jour. Geophys. Res., Jan. 15, 1964.
- [3] 《油层压裂》大庆油田《油层压裂》编写组
- [4] Pulpan, H. Schedegger, A. E., 1965.  
Calculation of tectonic stress from hydraulic well-fracturing data. J. Inst. Petroleum London, №. 497.
- [5] Киссин И. Г.  
Об исследованиях роль воды в сейсмических процессах. Физика Земли 1971, №. 3.
- [6] 《国外科技》1978年4期 P<sub>33</sub>. 广东省科技局编
- [7] 《唐山地震短临前兆资料》P<sub>67</sub> 唐山地震工作队编
- [8] 意大利《European》1977年12月9日
- [9] Ishihara K., Yasuda. 任意地震荷载条件下沙土的液化问题。第五届国际地震会议文集
- [10] 地震预报的新理论. Technocrat. 1974. №. 12, P60.
- [11] 末广恭雄 鲛鱼和地震 《国外科技动态》1978年2期 P60. 中国科学技术情报研究所编
- [12] 蔡祖煌, 石慧馨 地震活动期地下水气的运移——流体地质学纲要 北京市地震队 1978. 3.
- [13] 大竹政和, 1976. 松代地震十年. 《国外地震》1979年4期 P60. 于品清译 魏淳校.

# SOME ANOMALIES OF THE SHALLOW ZONE MECHANISM DURING THE IMPENDING EARTHQUAKE

Wang Liu-qiao Li Shan-yin

(The Seismological Bureau of Xinjiang Uighur Autonomous Region)

## Abstract

The short-term imminent precursors happened before many severe earthquakes in China may be summarized as follows:

1. The anomalies progressively migrated towards the epicenter from the outer boundaries.
2. The amplitudes of the anomalies alternatively fluctuated from high to low as they migrated towards the epicenter.

These two points mentioned above, have the significance of predicting the earthquake immediately before it takes place, because they are very easy to be discovered.

Presented here are the mechanism of the short-term imminent earthquake precursors on the underground water, the animal, the geoelectricity, the earth light, the earth gas, etc, and that of the precursor phenomena on the small earthquake actions, the ground deformation, etc—“hydraulic fracturing” mechanism. Before the earthquake, the underground “hydraulic fracturing” phenomena had been indirectly proved by the fact that the levels of the oil in the oil wells and of the water in the deep wells enormously raise mously (differently from decades to thousands of meters) immediately before the earthquake.

We suppose that the short-term imminent anomalies are directly under the influence of the shallow zone mechanism rather than the control of the seismic source.

Before the earthquake, the increase of underground stress and the way of increase, the closed degree of the underground reservoir aquifer body can be regarded as the causes how the pore pressure increased up to “breakdown pressure”. As the hydraulic fracturing phenomenon suddenly occurred and suddenly disappeared, the precursors caused by it are in general, jumpy too.

Many coseismic phenomena and the anomalies after earthquakes can also be explained by the theory of the “hydraulic fracturing” mechanism.