

试论地震水位异常变化的机理 与地震预报

李师群

(河北省地震局)

摘 要

本文从地下水位的变化与重力理论值成正相关的事实出发,阐明了水位变化是含水层应力——应变变化的反映。因而可以利用水位的变化来监测含水层的应变过程。在承压含水层受压时,其空隙减小,赋存其中的水被挤出向井孔中汇流,当含水层受拉张时,其空隙变大,孔隙水压减小,水由井孔又流入含水层的空隙中,由于水体的这种运移,实现了井孔的放大过程。井孔有很高的放大倍数和小的有效范围。据此,又进一步论证了观测井在多点集中的地壳应力场及其演变过程中所能监测到的信息和观测井的布设原则。

文章最后论述了观测井在地震预报中可能发挥的作用:单井只能对发震时间做出可能的判断,对于震中位置、震级的大小,要常一个完好的观测网才有可能做出科学的判断。

一、井孔的放大作用

众所周知,观测承压含水层的井,在正常情况下其水位变化(排除了其它因素的干扰后)与重力固体潮理论值呈正相关。在太阳和月亮的引潮力位高时(重力固体潮理论值降低),地壳向上凸(人们称之为固体潮),含水层被拉长,受水平方向的引张,空隙变大,水压降低,井水渗入含水层扩大的空隙中,因而井水位降低;相反,当引潮力位降低重力固体潮理论值升高时,地壳上凸部分缩回,含水层相对压密,空隙变小,孔压升高,空隙中的部分水被挤出汇入井中使井水位升高。含水层的应力——应变值变化越大,井水位的变幅也就越大。所以,井水位反映固体潮变化这一事实,证明了井水位变化是含水层应力——应变变化的反映。

在常温常压下饱水岩石样品的压缩实验研究结果^[1]告诉我们,岩石样品在弹性变形阶段随着压力的增加,体积缩小电阻率升高,是由于岩石裂隙的逐渐闭合,其中的水被挤出造成的。在扩容阶段,则由于新的裂隙的产生和增多,使岩样体积扩大,所以随着岩样体积的扩大,电阻率降低。这些事实证明,岩石的体应变不是组成岩石的颗粒被压缩(或膨胀)造成的而是岩石空隙体积扩大或压缩的结果。因为组成岩石的固体颗粒的压缩性比骨架和水的压缩性要小得多^[2],可以忽略不计。因而,岩层的体应变实际上可以认为是空隙体积的变化。同理,太阳和月亮引潮力位的变化引起了含水层空隙体积的扩大或缩小,使含水层与井孔之间发生了水体的运移。水体的运移与导体中的电流类同,是靠压差驱动的,由压力大的部位向压力小的地方运动。当压差消失,水体的运移

也停止。显然，含水层的导水系数 $T=KM$ 大，成井质量好，阻尼小的井，水体在运移中能量损耗少，运移速度快，反映地壳（含水层）应力—应变也灵敏。通过含水层与井孔之间水体的运移——流动，完成了井孔的放大过程——把含水层微小的体积变化集中到横截面积很小的井孔中，其水位变化则可达几至几十厘米，成为一个易于测定的量；同时，井孔又起到了调节含水层孔隙压的作用。井水位的高低是含水层孔隙水压大小的标志。并对水压没有放大作用。

既然井水位的变化是含水层体应变的反映，那么我们可以借变化的水位来了解含水层的应力应变变化。

设 $d\varepsilon$ 为含水层单位体积的应变变量， dH 为体应变量为 $d\varepsilon$ 时井水位的变化幅度； V 和 R 为能把应变信息传到井中的含水层的有效体积和距离； M 为含水层的平均厚度； r 为井孔半径； n 为含水层孔隙度； β_w 为水的体积压缩系数； ρ_w 为水的密度； g 是重力加速度。那么引潮力位高时，含水层受拉张，此时含水层空隙的增量（ $V \cdot d\varepsilon$ ）除接收含水层由于水压降低水体膨胀增大的水体（ $V \cdot \rho_w g n \beta_w \cdot dH$ ）外，还要接收从井孔中渗流来的水量（ $\pi r^2 \cdot dH$ ）才能达到压力平衡，所以有： $V \cdot d\varepsilon = (V \cdot \rho_w g n \beta_w + \pi r^2) dH$ (1)

改写(1)式

$$\frac{dH}{d\varepsilon} = \frac{V}{V \rho_w g n \beta_w + \pi r^2} = \frac{1}{\gamma_w n \beta_w + \frac{r^2}{R^2 M}} = b \quad (2)$$

式中 $V = \pi R^2 M$ ； $\rho_w g = \gamma_w$ （水的比重）； $\frac{dH}{d\varepsilon} = b$

b 是井孔含水层系的放大系数，它表示含水层发生一个单位的体应变时井水位的变化量；

$\frac{1}{b}$ 为井孔的灵敏度，它表示水位变化1毫米所相应的体应变变量。从式(2)可以看出，

当有效距离 R 增大时， b 值也将增大。

根据地球物理学者的计算，潮汐引起地球表面最大体应变变量 $d\varepsilon_{max} = 3.4 \times 10^{-8}$ ；水位的最大潮差 dH_{max} 各井可以观测到，利用式(2)可以求出 b （见附表）。从表中可以看出，我省各观测井的 b 值大体为 $n \times 10^9$ 。从式(2)中可以看出，要使井孔有尽可能大的 b 值和高的灵敏度，就要选择井孔少，分布面积大的含水层和尽可能小的孔径。此外，放大系数 b 值的大小，还与含水层的孔隙度（ n ），水的体积压缩系数（ β_w ）和比重（ γ_w ）有关。

井孔编号	dH_{max}	$d\varepsilon_{max}$	r (米)	M (米)	$b = \frac{dH_{max}}{d\varepsilon_{max}}$	$1/b$	R (米)
容1	108 毫米	3.4×10^{-8}	0.060	292.1	3.17×10^9	3.15×10^{-10}	198.6
雄新101	120	3.4×10^{-8}	0.056	148.0	3.53×10^9	2.83×10^{-10}	274.9
泽石	100	3.4×10^{-8}	0.091	84.8	2.94×10^9	3.40×10^{-10}	539.0
北杜	97	3.4×10^{-8}	0.083	224.7	2.85×10^9	3.51×10^{-10}	296
玉田	140	3.4×10^{-8}	0.067	136.4	4.12×10^9	2.43×10^{-10}	366

二、井孔的有效范围

华北平原(河北省)已有的观测井,所观测的多是奥陶系至震旦系的岩溶水。在巨厚的岩溶含水岩系之间,没有好的隔水层,再加上断裂的沟通作用,不论纵向还是横向,都有一定的水力联系,成为一个大的含水岩系。整个含水岩系大体上是在太行山区及山前地带接收降水或地表水的补给,向东渗流、排泄^[4],所以东部比西部封闭性要好些,但又都有不同程度的开启。尽管平原区观测井观测的是一个含水岩系,各个井之间又有水力联系,可是它们对地震前兆的反映却千差万别。如马17井在华北地区近几年发生的6次5级以上地震前都有异常变化,可是还有不少观测井却很少异常反映。这个事实启示我们,在同一个封闭或半封闭的含水层(系)中,尽管水井的放大系数很大,水压的传递速度又达10公里/时以上^[6],也不能将含水层(系)的应变信息传递到观测同一层(系)的所有观测井中去。能把应变信息传到井中的范围是很有限的。能把应变信息传到井中的范围可称为井孔的有效范围。有效范围的形状可能是多种多样的,但我们总可以假设一个以井孔为中心的园形面积与之等效,则等效园面积的半径可视为有效距离或有效半径,在求得b值后,根据式(2)可得下式

$$R = r \sqrt{\frac{1}{(1/b - \gamma_v n \beta_v) M}} \quad (3)$$

将 $\gamma_v = 1$ 、 $n = 0.06$ 、 $\beta_v = 4.67 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ 以及 r 、 b 、 M 等值代入(3)式,可分别算得各井的R值(见附表)。

从R值的计算结果可知,在地壳应变达 3.4×10^{-8} 的情形下,井孔的有效半径只有数百公尺。有些井孔观测的含水层封闭性不好或者仅仅是局部承压,但其水位变化仍然有明显的固体潮效应,其原因就在于观测井周围只要有几百米的承压含水层,就可以达到很可观的放大倍数。

如上所述,井孔的有效半径只有数百米。可是我们的观测井间距多在几十公里甚至数百公里,它们至震中的距离也多在几十公里至数百公里。远远超出了井孔的有效范围。那么如何能利用观测井监测到有效范围以外的地震信息,又如何能够据此做出地震预报呢?!为讨论这个问题,需要首先了解地震孕育过程中地壳应力场的分布特点及其演变。

三、多点集中的地壳应力场及其演变和观测井的布设

地壳构造是复杂的,就华北地区而言,也是由许多边界条件和力学性质不同的多层板状断块交接组成的弹塑性体。在同一区域应力场的作用下,其应力场的分布必然是不均匀的。既然井水位的变化是含水层应力一应变的反映,那么有应力一应变异常变化的地方的观测井的水位也一定要发生异常变化。所以,我们可以借助地壳应力场的分布及演变过程来代表井水位的变化进行讨论。

马宗晋(1980年)根据马瑾、钟嘉猷、潘秋叶、叶洪涛等人的一些典型构造的光弹

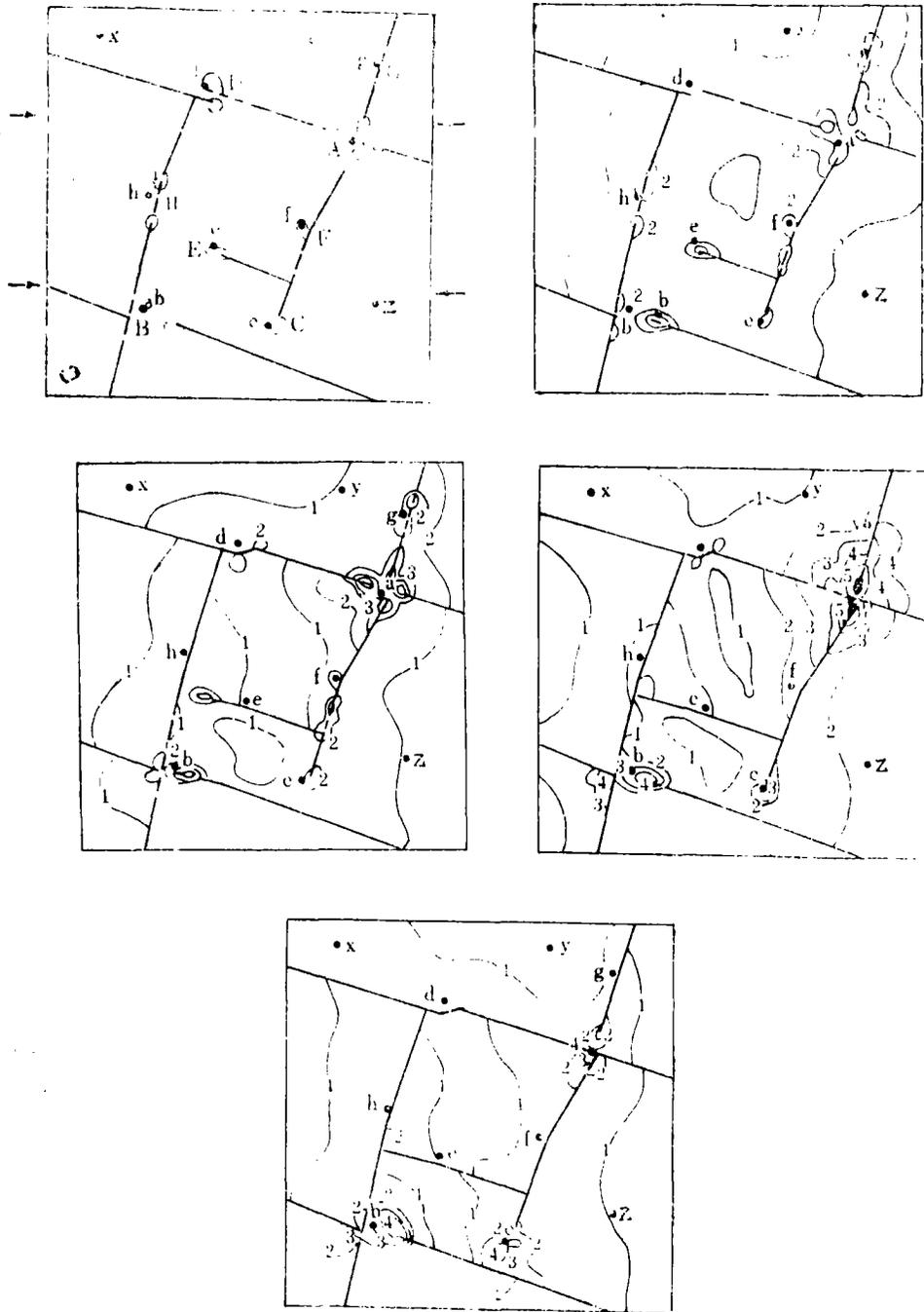


图1 多应力集中点场发育过程示意图

模拟实验结果，编制了一组以华北为背景的多点场发育过程的示意图（图1）⁶。光弹实验的材料虽然与地壳介质的力学性质差异很大，但就整个区域应力场的展布及其发展变化过程而论，还是很值得借鉴的。

图1—1至图1—V告诉我们，当区域应力场东西向强时，应力首先在A、B、C……H等断裂扭变带中闭锁段和断裂端部、拐弯处形成应力集中点，进而造成断裂扩展、蠕动、错断串通，从而又引起了应力场的重新调整，显示出了应力多点集中的不均匀发育和演变过程。如果每个应力集中点的突破（断裂扩展、错断串通——应力的释放）都是以地震的形式完成的，那么我们可以从中得到如下几点认识：

1、随着区域应力场的不断加强，联结比较薄弱的应力集中点首先被攻破、串通，发生小震，应力解除。而后，应力向较强的闭锁段集中；

2、各应力集中点是相互独立的，有各自的场强分布特点，与其他应力集中点所形成的应力场只有因果关系或同源关系，而无强度大小的必然联系；

3、一个大的应力集中地段被错断、串通要牵动全局，引起整个区域应力场的重新调整。一些地区可能应力下降，另一些地区则可能应力进一步加强，出现新的应力集中点。在同一个区域应力场内，相距很远的各个应力集中点的发展变化在时间上有一定的同步性。

4、每一个震源体的形成，都是区域应力场加强的结果，它们都是在区域应力场作用下的应力集中点，并非预先存在一个震源体。没有区域应力场的加强和应变能的积累，就没有震源体。

假设图1中的a、b、c……h及x、y、z是已有的观测井，那么除去x、y、z之外的其它井，因靠近地壳应力集中点，在附近应力集中点形成的应力场之内，能较早地接收到含水层的应变及其变化过程，反映地震比较灵敏，我们称之为灵敏井。如我省的河间马17井，自观测以来华北地区发生的6次5级以上地震都有不同程度的异常变化，可谓灵敏井。有的井则像图1中的x、y、z井一样，尽管有很高的放大倍数，固体潮效应很好，但始终未观测到异常变化，保持着正常动态，可算得非灵敏井或称盲井。

依靠盲井做地震预报显然是不行的。从地震预报的目的出发，我们的观测井最好都是灵敏井。为此，观测井的布设应尽可能靠近断裂的闭锁段、端点、拐弯处等应力易于集中的部位。

四、利用深井水位（流量）观测预报地震三要素的可能性

因为观测井的有效范围是很小的，远离观测井的应变信息传不到井中来，各灵敏井所能观测到的含水层的应变信息，是各自靠近的应力集中点形成的应力场在该井有效范围之内引起的含水层应变大小及其变化的反映，与其它应力集中点之间只有同源关系和因果关系，而无强度上的必然联系。如图1—1至图1—2中的D段发震前，只有d井能观测到D段的应变变化，其它井所观测到的异常变化都不是D段的异常反映；D点发震（串通）后应力解除，d井恢复正常，然而并不意味着整个区域内平安无事。相反，却增加了其它应力集中点发震的危险性；又如图1—VI至图1—V所示的A、G、F处应力的释放，a、g、f井恢复正常。与此同时，B、C两处应力进一步增强，发震的危险更大了。即a、g、f井恢复正常与b、c井异常量增大是同时发生的。依据上述事实，可得出下推论：

1、靠单井观测资料预报地震的发震时间是可能的。

各观测井只能观测到所在位置的应变变量，它不能告诉我们应力场是如何展布的，应力在哪里最集中，哪里应变变量最大，哪里次之。可是，因各应力集中点之间应力—应变的进一步发展、调整变化有同源关系，在时间上有明显的同步性，如唐山7.8级地震之前4~5天，北京地区的八宝山、海淀温泉、呼家楼、东方红汽车厂、顺义板桥各井水位都在上升的背景上转为下降；天津地区的双桥、北淮淀、表口、上古林等井水位在震前的7~9天在下降或下降转平的背景上转为上升^[1]。这些井虽然距震中的距离不同，所在构造位置不同，观测含水层也各异，有的水位在上升，有的水位正在下降，但它们都在同一时期内转向。而后发震。所以，靠单井的观测资料对本区或外区可能发震的时间予以估计是可能的。但对震中位置与震级的预报则不可能有充分的依据。

2、依靠一个好的完整的井网（这个井网要能控制各个可能的应力集中地段），可以大致确定应力集中的地区（段）、应变量的大小，从而有可能确定发震的区（段）及震级的大小。依靠异常变化形态的综合分析，可大致估计出发震时间。

3、随着地震的发生，断裂的扩展，串通，原来应力易于集中的地段变得不利于应变能的积累了，所以过去的灵敏井也可以转变为非灵敏井，相反，在一定条件下，盲井也有可能变成灵敏井，如图1—IV，在A处断裂串通（地震）前后，d、h井观测不到什么变化，在这段时期内可算做盲井；又如图1—V中B、C点处于危险状态时，曾是灵敏的d、e、f、g、h井，却给我们以平安无事的信息，成了不灵敏的井。情况是复杂的，所以必须做好综合分析。

五、结 语

利用深井水位（流量）观测网预报地震是有希望的。但水井所能测得的异常信息是非附近几百米或稍大范围的含水层的应变反映，是本地或区域应力场发展变化的一叶。其异常量的大小与将要发震的远地震源体没有量级上的必然联系，所以靠单井预报发震位置和震级依据是不充分的。地震的各种前兆信息是一母同胞，放大倍数很高的观测井的映震能力尚且如此，那么其它前兆台站的映震能力又如何呢？如何靠它们捕捉几十公里以外的地震前兆信息呢？笔者认为是值得研究的一个重要问题。

参 考 文 献

- [1] 北京大学地球物理系地球物理教研室及中国科学院地质所三室，岩石的结构、成份与它在单向压力下电阻率变化的初步研究，地震战线，4，1973。
- [2] 薛禹群等，地下水动力学，1979。
- [3] 侯茂生，蓟10井水位与应力应变的关系，地震学报，6，1，1984。
- [4] 李师群等，高压自流热水的基本特点及其观测技术，地震，1，1983。
- [5] 天津地质处，宝坻水源地76年抽水观测资料。
- [6] 马宗晋，华北地壳的多（应力集中）点场与地震，地震地质，1，1980。
- [7] 吴锦秀等，唐山地震地下水动态异常场与震源演变过程，地震地质，1，1980。