

# 用地下流体震前瞬间流动机制解释 大地震短临前兆的特征

王六桥 李善因

(新疆维吾尔自治区地震局)

## 摘 要

海城、唐山、松潘等七级大地震前,其短临异常表现出群体性、多样性、突发性、同时性、几起几落及异常群体向震中迁移等特征,简称一大二跳。而油、水井喷涌型异常,又是上述短临异常群体中的一种。对这种异常的机理研究表明,它要经过快速负荷加载、瞬间流动、卸载及渗流滞后三个过程。本文研究了伴随这三个过程可能会发生的地面垂直和水平的形变变化、应力变化、电磁变化等前兆现象。这些异常变化都因受控于震前快速负荷加载效应及瞬间流动效应,因而就能显示出大震前短临异常的上述特征。文章最后还对震前高孔隙压力产生的机理、地下流体瞬间流动的可能模式等问题进行了讨论。

## 引 言

海城、唐山、松潘等七级大震前,短临异常表现出群体性、多样性、突发性、同时性、几起几落及异常群体向震中迁移等特征,郭增建同志概括为“一大二跳”。这些特征似乎显示出在纷繁的临震前兆现象中有某种主导因素通过某种机制在制约着这些异常现象。郭增建等曾经用外因调制机制来进行解释<sup>[1]</sup>。本文则试图用地下流体的瞬间流动模式来进行解释。很可能瞬间流动模式内含于调制机制中,例如造成瞬间流动的原因之一可能是断层的蠕动。

瞬间流动模式是建立在对临震前油、水井喷涌型前兆机制解释的基础上而提出的。因此我们也将从快速负荷加载、瞬间流动、卸载—渗流滞后三个阶段来讨论它对各种被激发的前兆物理量的影响,以便解释大震前短临前兆的特征。

## 临震前油、水井地下水喷涌型异常的前兆机理

临震前地下水喷涌型前兆异常是从震前一个多月到发震这一时期发生的。它先在远离震

中区而后集中到震中区出现,先是由少量井而后以井群异常的形式显示出来,是七级大震前较突出和普遍的短临异常现象。对于4—6级地震,这种异常也经常观测到。由于这种异常信息远远大于噪声背景,故它是一种可靠的异常现象。

但它发生时间较突然而短促,很难捕捉它。这种异常有时间预报意义,可粗略给出发震地点,但与震级无明显关系。这方面的震例可见文献[2],有关机理的讨论在文献[3]中论证得很详尽,这里不再赘述。

图1给出承压封闭的单一深部水层震前喷涌型异常水位和流量的典型理论曲线。水位曲线历经 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$ 几个阶段,相当于时间 $t_n \rightarrow t_0 \rightarrow t_1 \rightarrow t_2$ 过程,其中 $t_n \rightarrow t_1$ 过程为异常前的正常状态。

整个异常水位曲线历经(1) $a \rightarrow b$ 阶段:称为快速负荷加载阶段,此时模拟快速负荷加载的地震力 $\Delta\sigma_z$ 突然垂直挤压水层,使水层孔隙压力水头增加 $\Delta H$ 。喷涌现象发生;(2) $b \rightarrow c$ 阶段:称为瞬间流动阶段。在此过程地震力 $\Delta\sigma_z$ 于 $t_0 \rightarrow t_1$ 过程继续加载并维持强度不变,井水喷涌,水层内的水通过渗流向井筒处汇集补给,发生瞬间流动。喷涌造成了以井筒为中心的空间分布为漏斗状的水位降落,可观测到喷涌水柱的逐渐降低;(3) $c \rightarrow d \rightarrow e$ 阶段:称为卸载—渗流滞后阶段。在 $c \rightarrow d$ 阶段,挤压水层的地震力 $\Delta\sigma_z$ 于 $t = t_1$ 时突然撤消, $\Delta\sigma_z = 0$ ,因而由它造成的附加水头 $\Delta H_0 = 0$ ,此时水位不能复原到 $H_0$ ,因为此时的合成水位为正常水位减去由于喷涌而造成水位降落,因此当喷涌突然停止后,可看到井筒内水位远低于正常水位。 $d \rightarrow e$ 称为渗流滞后过程,它表示渗流并未因卸载而停止,水流仍向漏斗处补给,直到漏斗填平,水位恢复到震前状态为止。

描述各个过程水位及流量的方程式如下:

$$H = \begin{cases} H_0 & t < t_0 \\ H_0 + \Delta H_0 = H_0 + \frac{n\beta + (1-n)\alpha}{2\beta\gamma} \cdot \Delta\sigma_z & \text{(快速负荷加载)} \quad t = t_0 \\ H_0 + \Delta H_0 - \frac{Q}{4\pi KM} W(u) & \text{(瞬间流动)} \quad t_0 < t < t_1 \\ H_0 - \frac{Q}{4\pi KM} W(u) & \text{(卸载及)} \quad t = t_1 \\ H_0 - S_{w'} = H_0 - \frac{Q}{4\pi KM} [W(u) - W(u')], & \text{渗流滞后)} \quad t_1 < t < t_2 \\ H_0, & t \geq t_2 \end{cases}$$

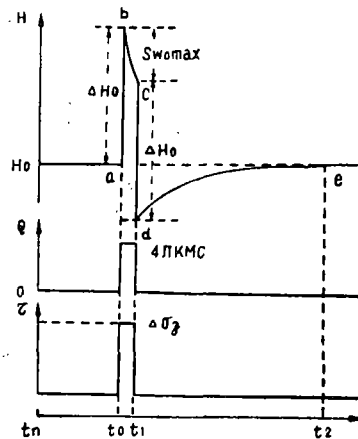


图1 震前喷涌型井水水位观测曲线H示意图

Q曲线为流量理论曲线

L曲线为挤压水层的“地震力”

Fig.1 A sketch map showing the observable curve of water level of gushlike well before the earthquake.

$$Q = \begin{cases} 4\pi KMC = \text{const} & (\text{瞬间流动}) \quad t_0 < t < t_1 \\ 0 & t \leq t_0, t \geq t_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{此处 } W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} - \frac{u^3}{3 \cdot 3!} + \dots$$

$$u = r^2 s / 4\pi KM(t - t_0)$$

其中 $H_0$ 为水层初始水头, $n$ 为孔隙度, $\alpha$ 为孔隙固体介质等效体积压缩系数, $\beta$ 为水的体积压缩系数, $\gamma$ 为水的比重, $S$ 为贮水系数, $K$ 为渗透系数, $M$ 为水层厚度, $d$ 为水层上盖层厚度, $r_w$ 为井筒半径, $Q$ 为流量。

这种地下水喷涌型前兆显示出,在临震前,地下出现了某种构造运动,造成了对水层的快速负荷加载,形成了高空隙压力源,破坏了地下水的平衡分布状态,引起了地下水的瞬间流动。

上述公式的导出,是建立在二维径向对称流地下水瞬间流动模式的基础上,下面我们仍根据此水流模式,推导它所激发的地形变、应力、电、磁等异常时、空特征。

### 瞬间流动引起的地面形变及应力变化

瞬间流动会造成水层压力水头的变化,设水头降低为 $\Delta H$ ,则水层承受上覆岩层的压力将减小 $\gamma \cdot \Delta H$ ,而转加到水层固体骨架上,使水层压缩(当水头增加,水层会膨胀),根据虎克定律及相应换算,得到

$$\Delta M = (S - n\beta\gamma) M \cdot \Delta H \quad (3)$$

$\Delta M$ 为水层厚度 $M$ 的改变(压缩)量,其它参数同上,即含水层厚度的变化与水头变化 $\Delta H$ 成正比。

水层厚度的变化通过上覆盖层反映到地表,产生地表的变形,由于喷涌造成压力水头的漏斗状空间分布,故水层厚度的变化也呈漏斗状。水层厚度的变化相当于给覆盖层施加一个分布力函数 $P(r)$ 。假定粗略地将覆盖层考虑成一个均一弹性薄板,其泊松比为 $\nu$ ,扬氏模量为 $E$ ,抗弯刚度为 $D$ ,则由周边固定圆形薄板的计算可求得覆盖层上表面(地面)产生的垂直位移 $W$ 将遵从方程

$$\left( \frac{d}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left( \frac{d^2 W}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} \right) = \frac{P(r)}{D} \quad (4)$$

结合边界条件,可求得 $w$ 、水平形变及应力的变化。

将上述瞬间流动引起地面形变及应力变化的原理应用于本模式的三个阶段:

#### 1. 快速负荷加载

水层受自下而上的应力作用增加 $\Delta H_0$ ,导致水层向上膨胀,则相当于给覆盖层一个均布载荷的托力,因而使地面隆起。设地面初始高程为 $Z_0$ ,则隆起后

$$Z = Z_0 + W_0 \quad (5)$$

#### 2. 瞬间流动

使地面隆起的水头增加量 $\Delta H_0$ ,会导致地下水层内出现渗流。当有渗流通道时,水会由

高水位向低水位渗流。由于降落漏斗的出现,水层对覆盖层作用的向下拉力为 $P(r) = \gamma \cdot \Delta H$ , 令 $P(r)/D = A + B \log r$ ,  $A$ 、 $B$ 为常数,且令 $R$ 为漏斗圆形边界半径,在边缘固定条件(6)下

$$(W)_{r=R} = 0, \quad \left(\frac{dW}{dr}\right)_{r=R} = 0$$

则方程(4)的解为

$$W_1 = \frac{r^2}{128} [2r^2 P(r) + 3B(R^2 - r^2) + 2BR^2] - \frac{BR^4}{64} \quad (6)$$

其中  $B = -\frac{\gamma Q}{2\pi TD}$ ,  $T = KM$ , 由(6)得水平形变

$$\begin{aligned} \epsilon_{r0} &= -\frac{3D(1-\nu^2)}{32Ed^2} \{[11B - 12P(r)]r^2 - 5BR^2\} \\ \epsilon_{\theta0} &= -\frac{3D(1-\nu^2)}{32Ed^2} \{[5B - 4P(r)]r^2 - 5BR^2\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\epsilon_{r\theta0} = 0$$

此时地面高程为

$$Z = Z_0 + W_0 - W_1 \quad (8)$$

故喷涌一旦发生,井周围地面会下沉,在 $r=R$ 处下沉为零,在井筒中心沉降最大。在 $r=R$ 处径向拉伸 $\epsilon_{r0}$ 最大,越接近井筒,径向拉伸变为径向压缩。在 $r=R$ 处切向压缩 $\epsilon_{\theta0} = 0$ ,在 $r=0$ 处切向压缩最大。

### 3. 卸载—渗流滞后

此时 $\Delta\sigma_z = 0$ ,  $\Delta H_0 = 0$ ,  $W_0 = 0$ , 故高程变化为

$$Z = Z_0 - W_1 \quad (9)$$

当漏斗消失后,  $W_1 \rightarrow 0$ , 一切复原。

因此,喷涌井造成的漏斗区,或因渗流而造成的压力水头下降的地区,按照三个阶段的进程,会发生先上升,后下降的急速变化,此时倾斜仪会发生急剧反向,但它不是指向或背向震中,而是指向或背向瞬间流动的汇点或发散点方向。

公式(6)、(7)引起的形变会产生相应的应力变化,由(6)式应力变化为

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{3Dr^2}{32d^2} [B(11+5\nu) - 4(3+\nu)P(r)] - \frac{5BD}{64} R^2(1+\nu) \\ \sigma_\theta &= \frac{3Dr^2}{32d^2} [B(5+11\nu) - 4(1+3\nu)P(r)] - \frac{5BD}{64} R^2(1+\nu) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sigma_{r\theta} = 0$$

这个应力场应是脉冲状的急剧变化。

## 瞬间流动所引起的渗滤电场及电流的磁场

水在岩石中流动会产生渗流电场,与电解质流过毛细管产生的过滤电场机制相同。由单井喷涌地下水渗流模式造成的渗滤电场的正、负电荷分布如图2。地面上一点 $P(x, 0)$ 处的

电位应由正、负两部分电荷的电场叠加而成，故  $U_P = U_1 + U_2$ ，地面上两点间电位差

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_1 + U_2 - U_1' - U_2' \\ &= \frac{Q'}{4\pi\epsilon M} \left[ \left( \sinh^{-1} \frac{d+M}{x} - \sinh^{-1} \frac{d}{x} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sinh^{-1} \frac{d+M}{x+R} + \sinh^{-1} \frac{d}{x+R} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sinh^{-1} \frac{d+M}{x-R} + \sinh^{-1} \frac{d}{x-R} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left( \sinh^{-1} \frac{d+M}{x'} - \sinh^{-1} \frac{d}{x'} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sinh^{-1} \frac{d+M}{x'+R} + \sinh^{-1} \frac{d}{x'+R} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sinh^{-1} \frac{d+M}{x'-R} + \sinh^{-1} \frac{d}{x'-R} \right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$x$ 、 $x'$  为 P 点、P' 点至井轴的距离  $x=r$ 、 $x'=r'$ ，且有电荷守恒条件

$$M\lambda = 2\pi RM|\sigma_0| = |Q'|$$

$\lambda$  为正电荷线密度， $\sigma_0$  为负电荷的面密度， $\epsilon$  为水层及覆盖层岩石的平均介电常数。

这种渗流电场因快速负荷加载阶段无渗流出现而不存在，在瞬间流动至卸载阶段才建立，故也为脉冲状，且电位  $U_P$  在空间分布上有正有负，但正电位较强。当卸载后，这个电位会慢慢消失。

上述渗透电流体系会感应磁场。1975年水谷 (Mizutani) 等<sup>[5]</sup>为解释松代震群期间地磁场的变化曾提出水的电动效应，引用了电流密度  $j$  和水流量密度  $q$  的两个方程式

$$\begin{aligned} -j &= \phi\sigma' \text{grad} E' - \frac{\phi\epsilon_0\zeta}{\eta} \text{grad} P \\ -q &= -\frac{\phi\epsilon_0\zeta}{\eta} \text{grad} E' + \frac{K}{\eta} \text{grad} P \end{aligned}$$

此处  $\phi = n/1-n$  为孔隙率， $\sigma'$  水电导率， $\epsilon_0$  为水的介电常数， $\eta$  为水的粘滞系数， $\zeta$  为流动电位， $E'$  为大地电位， $P$  为孔隙压力。在一个不大的范围内， $E'$  可认为不变，则喷涌井渗流模式中

$$\begin{aligned} q &= Q \exp \left[ -\frac{r^2 S}{4KMt} \right] / 2\pi r M \\ j &= -\frac{\phi\epsilon_0\zeta Q}{2\pi r KM} \exp \left[ -\frac{r^2 S}{4KMt} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

井筒壁流向水层的总电流强度

$$|I| = j \cdot S' = 2\pi r M j = -\frac{\phi\epsilon_0\zeta Q}{K} \exp \left[ -\frac{r^2 S}{4KMt} \right]$$

设渗透电流主要在水层中分布，则由毕奥—沙伐定律，可求出图3所示的地面一点 P 的磁场。例如先求出  $0'A$  电流线穿过  $d\sigma$  单元在地面 P 点造成的磁场强度

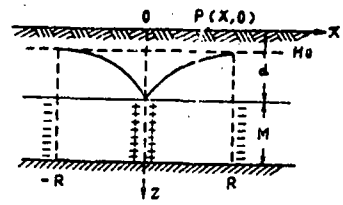


图2 瞬间流动渗流电场的电荷分布

Fig. 2 Distribution of charge of percolation electric field formed when ground fluid flows in an instant.

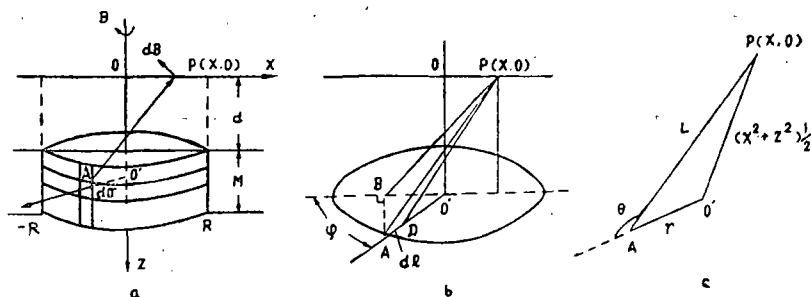


图 3

a. 水层中渗流电流在地面P点感应的磁场强度, 先求A点的电流元在P点的磁场dB

b. 电流元AD = dl 在P点产生的磁场

c. 用r、x、z表示sinQ

$$dB_A = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^r \frac{Idl \sin\theta}{L^2} = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^r \frac{jdsdl \sin\theta}{L^2}$$

其中 $dl = dr$ ,  $L^2 = r^2 \sin^2\phi + (x + r\cos\phi)^2 + z^2$ , 再由图3c将 $\sin\theta$ 换成用r、x、z表示, 对整个电流体系求得总磁场强度

$$B_P = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_d^{d+M} dz \int_0^r \frac{jrd r \sin\theta}{L^2} \quad (13)$$

其中的j见(12)式, 可代入(13)式求解。

由(13)式可知, 这种水电流模式所造成的磁异常一般只在水平分量上出现。伴随有大量地下水涌出的日本松代地震群, 就曾观测到地磁场水平分量的变化。此外, 此磁异常也是在瞬间流动至卸载阶段建立, 呈急剧的脉冲状变化, 在渗流滞后阶段而逐渐消亡。

### 瞬间流动引起的地下气体含量异常

在取样井中, 正常情况下, 由于水中溶解的各种气体含量不断逸出水面, 设过程是等温的, 则气体溶解度仅与压力有关, 由水面往下, 静水压力逐渐增大, 因而溶解度也逐渐增加, 溶解气以分子扩散形式运移, 并在长时间内在井筒内建立了动态平衡。这种动态平衡的空间分布在理想条件下其等浓度面也呈漏斗状。一般在井中取水样(实际是在这个漏斗中取), 其气体含量浓度 $C_0$ 要低于水层深处的气体含量 $C_1$ 。只有当地下发生瞬间流动, 深层水流出破坏了扩散的动态平衡时, 才会得到比正常观测值为高的气体含量值。在没有水的串层现象发生也没有诸如超声振荡等激发因素时, 异常的幅度应为 $C_1 - C_0$ , 因而气体含量异常在瞬间流动阶段才会出现。

### 瞬间流动造成的各前兆量时空异常之综合

图4是临震前瞬间流动造成的各前兆量时、空综合示意图, 其中图4a表示地面任一定点异常时间进程图, 图4b表示某一固定时刻异常的空间分布。

由图4a看出, 各异常量都是在 $t_0 \rightarrow t_1$ 时间段内建立起来的。从观测可知,  $t_0 \rightarrow t_1$ 一般

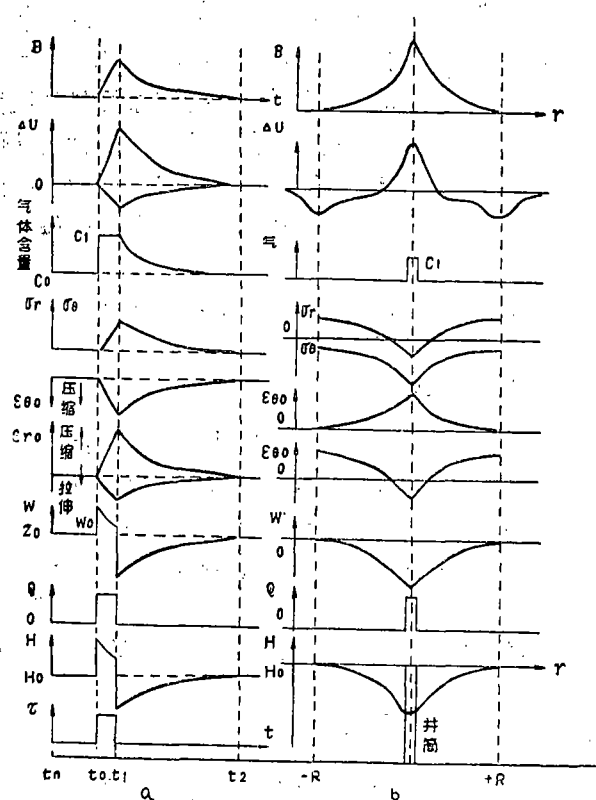


图4 震前瞬间流动机制造成的前兆异常时、空图综合

a. 时间进程曲线 b. 空间分布 c. 计算曲线

Fig. 4 The time and space map of premonitory change produced by the mechanism formed when ground fluid flows in an instant.

状态是非常复杂的。从这个意义上讲，本文所用的地震力模式、介质模式、瞬间流动模式等都是相当简化了的，一些被激发的前兆量缺乏具体数值，因而其大小和实际观测值是否相符也都值得商榷，但这种简化并不完全脱离实际，并且作为一种浅层机制，还是能解释一些短临异常特征的。

喷涌型井水前兆异常，是震前水层出现高孔隙压力及瞬间流动的证据。因构造变动而产生高孔隙压力的机理之研究以及产生瞬间流动的通道之机理的研究，不只是地震学中涉及的问题，在其它领域例如石油成因等领域中它可能更加重要，研究得更早〔7〕。本文是根据水层的弹性贮放效应〔6〕导出的结果。在地震前，采用液压破裂模式〔2〕也许更好，例如，液压破裂有个破裂压力阈值，原生的张裂隙、层面、断裂或压开的裂隙都是可能的通道。达于阈值，通道张开，瞬间流动发生；低于阈值，通道闭合流动停止。破裂压力阈值可以成为启动水动力异常及其它被激发异常的开关，因而有利于解释短临异常的特征。

从几十分钟至数天，各前兆曲线的共同特点是同时发生、群体性、多样性、突发性、幅度较大。从 $t_1 \rightarrow t_2$ 一般异常有一个迅速的衰减，但要经过一段时间才能完全消失。 $t_1 \rightarrow t_2$ 通常从几天至一个月左右。所有上述异常均受地震力及地下流体运动控制。特别是异常的开始到异常峰（谷）值这一段，里面包含有地震力及瞬间流动信息，而异常的恢复段却只含有渗流的信息了。如造成地震力的临震前构造运动有几起几落，则地震力便有几起几落，因而上述异常也有几起几落。如果造成地震力的构造运动有向震中迁移的现象，则异常群体也会向震中迁移。这种产生地震力的构造运动是较为普遍的，断层蠕动直至预滑都可能是这种构造运动。

我们就是用这种机理来解释海城、唐山、松潘等大地震前短临异常的“一大二跳”、向震中迁移的特征的。

## 讨 论

大震前，由于地下应力状态急剧变化或调整，在相应的区域中地下水平衡状态会被破坏，肯定会造成地下流体的运移。由于区域构造的复杂性，地下水文地质条件的复杂性，地下流体的运动

本文引用的“地震力”概念,用于解释含水层受它压缩而产生的高孔隙压力。这个概念是容易为地学家接受的。迪金森(Dickinson, G.)休伯特(Hubbert, M. K.)和鲁比(Rubey, W. W.)、特察(Terzaghi, K)等<sup>[7]</sup>曾提出过负荷的快速增加可导致孔隙流体压力暂时性或永久性增加的概念。对于密闭隔绝的层系,负荷增加较慢也可产生过剩孔隙压力。对于连通性较好的层系,快速(冲击式)增加负荷也可产生高孔隙压力(暂时的)<sup>[6]</sup>。所有这些概念作者在1978年就曾独立地提出过<sup>[3]</sup>,这里所提的“地震力”概念,是试图将负荷的增加模式化、量化。

(1983年1月27日收到初稿,1983年11月收到修改稿)

### 参 考 文 献

- [1]郭增建、秦保燕,论短临地震预报的调制模式,西北地震学报, Vol. 2, № 1, 1980.
- [2]Wang Liu-qao and Li Shan-yin, A study of the phenomena and mechanism of pre—quake stimulation of oil and water wells, international symposium on earthquake prediction, unesco eeadquaters, Paris 2—6 April 1979.
- [3]王六桥、李善因,大震前地下水喷涌型前兆异常的物理机制,地球物理学报, Vol. 25 (增刊), 1982.
- [4]王启德,应用弹性理论,机械工业出版社, 1966.
- [5]Hitoshi Mizutani, Tsuneo Ishido, A New interpretation of magnetic field variation associated with the matsoshiro earthquake, J. Geomagnet Geoelec., Vol. 28, № 2, 1976.
- [6]P. E. 格雷泰纳,孔隙压力的基本原理通常所引起的后果及其构造地质含意,石油工业出版社, 1982.
- [7]薛禹群、朱学愚,地下水动力学,地质出版社, 1980.



## MOMENTARY FLOW MECHANISM OF SHORT TERM EARTHQUAKE PRECURSOR

Wang Liugiao Li Shanyin

(*Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region,  
Urumqi, China*)

### Abstract

Immediately before an earthquake the pressure water layer may produce momentary flow under the action of pulse-shaped earthquake force. In the light of the unsteady flow theory the authors proposed a mechanism to calculate the theoretical curves of the water level drop and the flowing rate of the underground water in the abnormal boreholes according to the radial symmetrical flow model so as to imitate the typical observational curve of the uprising of well water. The developing process of this mechanism requires the formation and vanishing of a funnelshaped distribution of ground water level. Therefore, it is necessary to make further calculations on the theoretical abnormal curves of vertical deformation on the ground surface, gravity, geoelectricity and geomagnetism. These phenomena are all related to the growth and decay of the funnel. Before a strong earthquake, lots of abnormal points of uprising of well water type are generated. At the same time, due to variations of the ground stress and deformation field, the balance state of ground water distribution is disturbed and subsurface fluid flows along faults and crevasses. Thus, geophysical effects more complex than radial symmetrical flow will be produced. This is a shallow layer mechanism of short-term precursors.