

震源模式、断层蠕滑和形变波的传播

——源和场的初步探讨

朱 令 人

(新疆维吾尔自治区地震局)

根据室内实验研究和地震现场观测,进行震源孕育模式及前兆理论研究是一项极为重要的工作,在一定意义上是突破地震预报难题的关键工作,是综合分析的物理依据。近些年来,国内外许多学者进行了大量的实验研究和理论概括,提出了多种模式^[1-11]。我们试图从实际资料出发,对此问题进行一些讨论。

(一) 一些基本事实

(1)绝大多数地壳浅源地震都发生在10—30—50公里的深度。这深度在不同地区是不相同的。在华北约10—25公里。在天山北麓约20—40公里,天山南麓约20—45公里。通常在0—5公里内没有较大地震,一定深度以下也没有较大地震。一次大地震的余震不仅在平面上集中分布于一定区域内,而且在深度上也集中分布于一定层内。如海城地震余震的震源深度分布(图1)就在16—17公里以上,4.0级以上地震则集中于7—17公里范围内^[12]。这种浅源地震深度分布在一定层位的现象早为人们所熟知。对此有

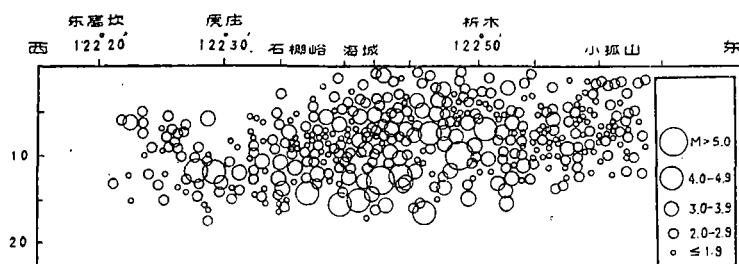


图1: 海城地震震源深度分布(沿北69°西走向)

许多解释,认为与各地地质构造,岩层性质,应力积累条件,温度和压力情况等有关,还可能与岩体中的水(某种程度的溶液)的状态有关。但对此现象同震源孕育模式有何联系则讨论很少。

(2)大地震的孕育、发生、发展过程中存在着多种复杂的异常,按其内容和特性来说可分为两类,一是大范围、长时间、小量值、平稳发展的趋势异常;二是更大范围、短时间、大量值、跳跃发展的突发异常。这两类异常在时间进程,空间分布,变化特征,量值大小,种类多寡等方面都有着极其明显的质的差别。正确认识和把握两类异常

的规律是综合预报的基础。给两类性质不同的异常以统一的物理解释是震源孕育模式必须解决的问题。尤其是对于大量丰富的短期、临震突发异常的本质认识,是实现地震有效预报的关键。

(3)大地震发生后突发异常并不消失,几乎普遍存在,且往往有更大的幅度。这在唐山地震,松潘—平武地震的总结中都有报导。这里再举几例:图2表示1977年7月23日新疆库车5.5级地震后附近油矿10号井和402号井油水自喷量的异常;图3表示1975年1月14日乌鲁木齐庙尔沟5.0级地震后乌鲁木齐水氦含量异常。

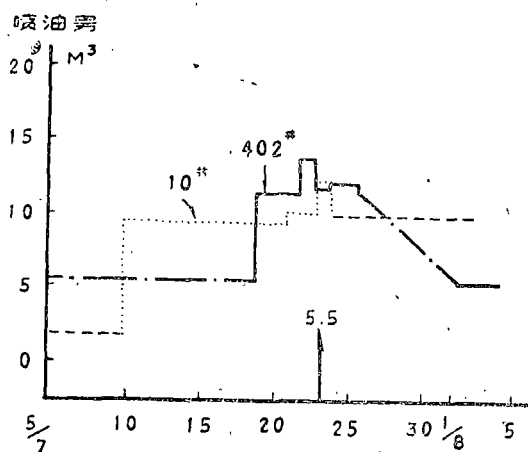


图2 1977年7月23日库车5.5级地震前后
库车油矿两口井自喷量简图

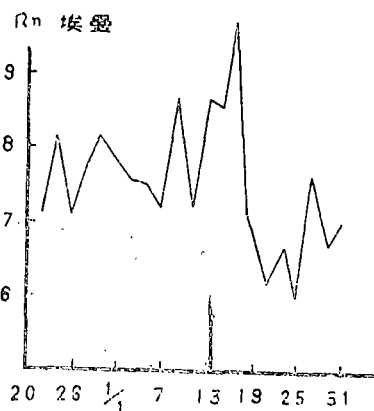


图3 1974年1月14日庙尔沟5
级地震后乌鲁木齐水氦异常

(4)无震异常的存在是十分有趣的事。在实际工作中,不少同志遇到“异常是真实的,但地震却没有”。如1975年冬到1976年春,辽西曾出现大量突跳变化和宏观现象,异常明显突出,但没有地震发生。

(二) 关于震源模式的讨论

郭增建等同志在1973年提出了震源孕育的组合模式^[6],1977年又进一步阐述了组合模式的合理性^[7]。我们认为是有道理的。

根据浅震震源集中分布于一定层位的事实,可以设想,不仅在平面上存在有积累单元和调整单元,而且在地壳垂直剖面上也可以划分出应力积累和应力调整两类层位。这样,一个震源的形成,在垂直剖面上将有三层:上调整层、积累层和下调整层。

和调整单元的作用相仿,调整层的作用是:(1)不积累巨大的剪切应力,而是把它调整转移到积累层的上下底面,使该处的应力增强,促进震源的孕育和形成;因此,在调整层中不发生大的地震;在震源孕育过程中,在积累层上下底面处将发生前震活动^[13];(2)当地震发生,积累层产生垂直向位移时,由于调整层在震前的蠕动,形成压、张区,为岩体垂直位移让出了位置,并使错动停止。

调整层的存在不仅是可能的,而且是必要的。没有它,地震错动在深度上将将是无限制的,这是难以设想的。

对某些大地震,其破裂面可直达地表。此时地表空气层就是最好的上调整层,对稍深的地震,莫氏面或上地幔软流层可能是其下调整层。

根据秦保燕等同志研究,地壳中的某些软弱面如康氏面附近的低阻层、低速层都可能起调整作用^[14]。

由此可见,每一具体的地震,其上下调整层究竟是那些层,要根据深部物探、震源深度等资料进行具体分析。

各调整层的性质是不同的,一般来说,近地面的调整层岩体比较松软,断裂发育,含水较多,耐剪强度较小,在较低应力作用下就会发生滑动或破裂^[15];较深的调整层虽然岩体比较均一,但因温压较高,岩石物化性质变化较大,对长时间作用的应力来说,会表现出相当大的流变性,以粘滞流变形式释放能量。

近地面断层的蠕动是经常被观测到的事实,较深层的粘滞流变也被间接地观测到^[16]。

指出调整层的存在可能并非没有意义。如果我们能观测到调整单元和调整层蠕动(或流变)速率有显著增加的话,可能表明地壳运动的加剧、积累单元和积累层的应力集中和积累在加速,也就是震源孕育和形成的过程在加速,作为较长时间的危险性估计是有意义的。

(三) 断层的蠕滑、小破裂错动及形变波的传播

在构造应力作用下,调整单元和调整层持续地发生塑性变形,蠕动或小地震,把应力调整转移到积累层的积累单元(为叙述方便,后面只提积累单元)的两端,开始震源的孕育过程。随着应力的积累,岩体发生弹性形变。应力积累到一定程度,出现张性微裂缝,导致岩石扩容。这些已为大量实验所指出,也为大多数学者所接受。除此以外,我们认为在震源孕育过程中,至少还存在有两个普遍的力学现象:断层的蠕滑和小规模破裂错动。它们与地震突发前兆有着密切的联系。

1. 断层的蠕滑

从力学观点来看,地震是突然发生的不稳定现象。对于地壳内发生的浅源地震,脆性破裂和断层粘滑是两种最可能存在的力学不稳定性。

粘滑之前总存在有短促的稳定滑动,这是许多实验和文献所指出的。影响滑动稳定性的主要因素是有效围压、岩石类型、温度、断层泥厚度等^[15、17、18、19]。

图4为粘滑试验中应力—应变曲线,其中S即为稳定滑动所引起的予位移^[15]。

根据断裂力学研究具有宏观裂纹的材料,其脆性破裂的过程,本质上是原有裂纹在一定条件下不断扩展的过程,也就是由裂到断的扩展过程。描述裂纹尖端附近应力场特性的叫应

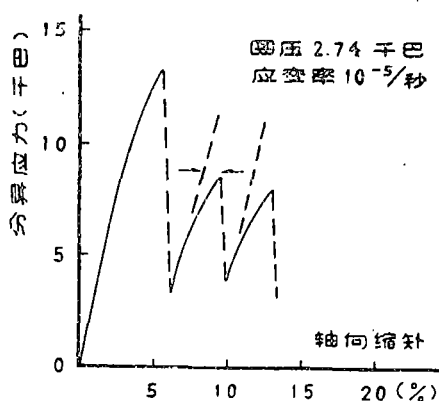


图4 花岗岩粘滑实验应力—应变曲线, S为予位移

力强度因子 K 。 K 值随着外加应力 σ 的逐步增大而增大,达到一定数值,裂纹开始稳态扩展,达到某一极限值 K_c 时,裂纹发生不稳定扩展。这时,即使外力不增加,裂纹也会自行迅速地扩展到断裂。

我们认为这样的看法是有道理的:地壳中发生的脆性破裂地震可看作是岩体中早已存在的宏观断裂由稳态扩展向非稳态扩展发展的结果。

这样,无论是脆性破裂还是粘滑机制引起的地震,在其失稳错动之前,都可能发生蠕滑(予滑,稳滑)。一般说来,临近失稳扩展时,稳滑的速度比较大。

对地震来说,由于介质的不均一性,宏观裂纹存在于许多地方,加上应力分布的不均一性,所以情况更为复杂。大震前将会存在有不同速度、规模的蠕滑,一般说来,愈近临震,蠕滑的速度和规模将愈大。不仅如此,整个过程可能产生分段多次蠕滑。

2. 小规模破裂

随着应力不断积累增高,加上介质的不均匀性,在大规模破裂发生前,必然有局部地方或者应力相对较高或者介质抗剪强度相对较低而发生小规模破裂和错动。

图5表示花岗岩破裂前应力—应变曲线及小破裂事件频次曲线^[19]。从中看到在岩石破裂应力约二分之一之前,小破裂活动水平低且稳定。从二分之一破裂应力左右起,活动性速增。在最后百分之几内,小破裂活动性急剧增加。1975年海城地震的前震活动就与此非常相似。对粘滑机制,虽然没有小破裂活动急增现象,但实验表明,无论是粘滑本身还是粘滑前的短促稳滑,都要克服接触面上凹凸不平相互啮合的障碍,因而也会产生一些小破裂错动。

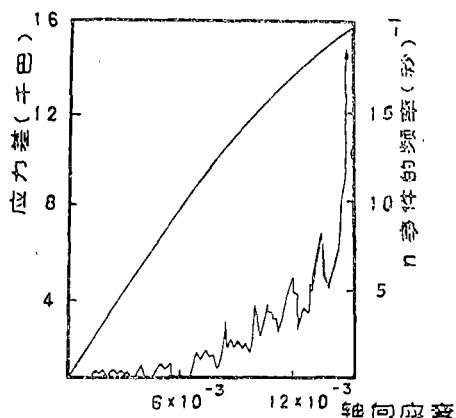


图5 花岗岩中的微破裂事件

综上所述,大地震发生前,震源及附近地区,各种速度的蠕滑(予位移)及小破裂错动可能是普遍存在的。这样,地震孕育发生过程就经历了弹性形变(I)—扩容(II)—蠕滑(III)—地震错动(IV)—震后调整(V)几个阶段。作为前兆的小破裂错动从扩容阶段就可能存在。

显然,断层的蠕滑和小破裂错动比较弹性形变、扩容更可能是许多短临前兆的主要原因。

震源及附近地区的断层蠕滑和小破裂错动将产生三个最为明显的后果:一是断层蠕滑释放部分能量,使断层蠕滑段两侧应力显著减小,引起扩容的张性裂缝重新闭合。与此同时,对未滑段来说却加速了应力的积累,促进了地震的发生;二是沿主断层走向展布的宏观小裂缝串通发展成为大裂缝,从而为深部物质的上涌提供了通道;三是小破裂错动和断层蠕滑将激发辐射出频率范围非常宽的弹性—塑性(形变)波。频率超过20000赫芝为超声,30—5000赫芝是地声,0.01—10赫芝是可被地震仪记录的前震,低频、超低频的形变波可用长周期地震仪、脉动仪、地倾斜仪、水准、基线等测量观测到。这种形变波的性质决定于蠕滑的规模和速度,且主要决定于速度。滑动(错动)能量转化

为弹性形变波，有一个效率的问题，它与能量释放速度有极大的关系。当释放速度很慢时，效率几乎为 0，则不产生形变波。所以在临近发震前，蠕滑达到相当速度时，才可能有形变波的产生和传播。

如果我们把扩容区作为前兆近场的范围，扩容区外称为远场。那么由于应力所及范围和介质吸收关系，局部应力松弛和高频弹性波辐射是近场短临前兆的主导因素，而对于远场来说，则低频形变波的传播才是引起突变异常的可能原因。这里某种波通道的存在和各地构造条件的差异将使远场短临异常出现更复杂的图象。

这样，对近场来说，地震孕育过程的五个阶段在异常发展上均有表现。对远场来说，将缺失扩容这一阶段，可分为弹性形变—震前形变波动—错动—震后形变波动几个阶段。离震中太远的地方则弹性形变异常也不能出现。

这就是我们关于单一震源和前兆场关系的看法。

（四）某些异常的简要解释

1. 异常总述

一般说来，应力—应变能的积累在非常长的时间内是以恒定的速度持续地进行的。因此震前震后地壳运动速度的任何突然变化，必定代表应变能的释放而不是积累的速度变化^[20]。

因此，相对于地震过程的五个阶段，应力—应变的积累释放过程可分以下几个阶段：（Ⅰ—Ⅱ）均匀持续积累—（Ⅲ）局部释放，积累速率下降—（Ⅳ）强烈释放—（Ⅴ）调整释放。

对照这几个过程，进一步分析可以看出，在（Ⅰ—Ⅱ）阶段，是应力的持续积累而引起了震源区及外围区的弹性形变和扩容，应力的积累起主导作用；在（Ⅲ—Ⅳ—Ⅴ）阶段是震源及附近地区断层的蠕滑，小破裂错动，大规模错动而引起应力—应变的释放，断层的蠕滑、破裂运动起主导作用。这是两种性质不同的情况。联系到两类性质不同的异常，我们认为，正是主导因素的不同从根本上决定了长中期趋势异常和短临突变异常的质的不同。

根据这一认识，对长中期趋势来说，应力积累和应力传递的特性和规律就一般地决定了趋势异常的特性和规律。尽管有各种具体条件的影响，但一般规律的认识还是比较明确。例如震级愈大，震源体规模愈大，应力应变能积累就愈大，异常持续时间就愈长，异常范围也愈大；因为应力的积累是从震源区逐步向外扩展，所以趋势异常起始时间也是由内向外发展的；由于应力积累值是向外逐步递减的，所以异常幅值也是由震中区向外围递减并且与台站所处的位置是否靠近断层或节线有关；由于应力的积累在地域上有相当的规律（如四象限分布），所以趋势异常也有相当的规律；由于应力的积累是逐步的连续的，所以趋势异常的发展是平稳渐变的；各种趋势异常在力学上往往有统一性也是有说服力的证据。

与此不同，对短临突发异常来说，是断层的蠕滑、破裂运动起主导作用。因此震源及附近地区断层蠕滑、破裂—应力应变的局部释放—弹塑性形变波的传播等的特性和规律就一般地决定了突发异常的特性和规律。这里，一则由于对应力应变释放规律的研究

和认识不够,二则各种具体条件(如地质构造、岩性、水文地质、地球物理、地球化学等)的影响起很大的作用,因此,对突发异常规律性的认识较差。就一般来说,具有一定的随机性,因而有一定的统计特征。例如,由于应力应变的局部释放,造成趋势异常短期的加速、转折、回返等;由于蠕滑破裂运动是突然发生的,所以突发异常是跳跃发展的大量值的;由于形变波的传播比应力传递范围更大且受具体条件影响甚大,所以突发异常范围广而不均一,甚至比趋势异常范围更广;由于断层蠕滑、小规模破裂、裂缝串通、微裂隙闭合等多种机械运动引起了许多物理的、化学的变化,造成突发异常的多样性;蠕滑可能多次发生并将引起突发异常的多次出现;蠕滑通常从调整单元向积累单元发展,导致突发异常从外围向震中的发展;形变波的传播引起远场突发异常的单点、多点突跳及振荡突变等等。

下面就几种手段的典型异常作一简要解释。

2. 小地震活动异常的解释

大震前小震活动从时间上来说,在扩容阶段就出现异常,对破裂机制,小震活动频次在震前急速增加,而粘滑机制则无明显变化。这两种情况是经常遇到的,前者以海城地震为例,后者可以唐山地震为代表。

小震活动的空间分布:受应力积累的作用,在两个剪切应力最大的方向出现成带分布;调整层调整单元的蠕动和破裂要早于积累单元,所以这里首先出现小震。其结果使应力转移集中于积累单元的两端和上下底面,因此在这些地方首先出现扩容,平面上就出现小震围空区。显然空区的大小与积累单元的规模有关,也就是与未来地震震级大小有关。

b 值的变化:在趋势异常阶段,由于应力不断积累,反映应力大小的 b 值降低,出现负异常,而在临震阶段,断层较快蠕滑,应力值相应下降,出现临震前 b 值的回返和正异常。

小震主压应力轴:在震源应力场作用之下,小震主压应力轴由正常的随机取向到有规律取向(排队)。到短临阶段,由于蠕滑,应力局部释放,主压应力轴出现转向。由于断层蠕滑方向与地震错动方向一致,所以大震主压应力方向与转向后的的小震主压应力方向一致〔21〕(图 6)。

3. 地震波速度比异常的解释

岩石受压到一定程度产生张裂隙,出现扩容,泊松比下降,导致纵横波速度比下降异常。异常持续时间与震级成一定正比关系,异常区长轴与断层面走向一致等已有较好

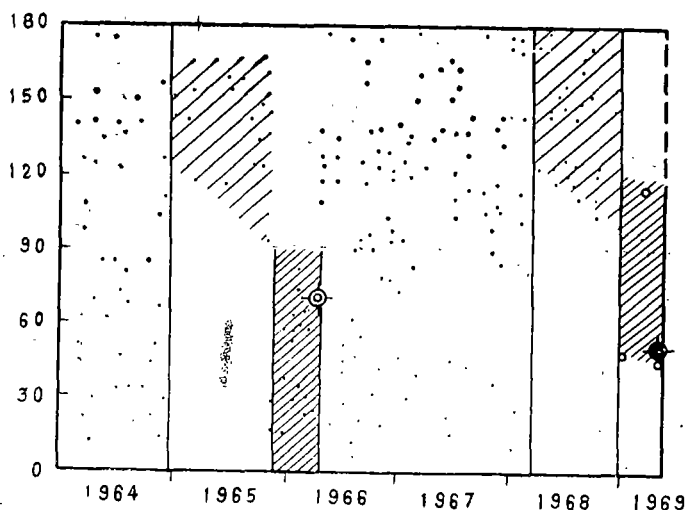


图 6 小地震主压应力轴方位角随时间分布

解释, 无须赘述。

积累单元端部集中较大应力, 且调整单元介质较软弱, 易于扩容, 所以波速比异常从较远端开始, 逐步向震中发展。

断层的蠕滑引起两侧微裂缝的闭合是波速比回返的原因。这种蠕滑应是小断层在前, 主断层在后, 主断层的蠕滑通常是由端部向中间扩展的, 所以波速比的回返也是从外向震中区迁移的。

由于断层蠕滑可能是分段、断续的, 加上波速比恢复在地区上先后不一, 所以在异常的延迟曲线上出现波动起伏。

临震蠕滑的加速进行, 引起裂缝的急速闭合, 可能造成孔隙压力的过饱和状态, 造成波速比回返过头, 超过正常值。

4. 地形变异常的解释

弹性形变、扩容、断层蠕滑及形变波都可以引起所涉地点的地壳形变。因而形变异常颇为复杂, 我们先逐项分析。

弹性形变随应力积累而变化。应该说多年变化不大。但由于调整单元的蠕动使应力转移, 在积累单元端部首先出现应力积累的加速, 并逐步向外围发展。弹性形变影响范围远比扩容区大得多。在蠕滑释放部分应力时, 弹性形变异常应有回返现象, 其回返幅度及开始时间均由震源区向外围递减和推迟。

扩容引起地壳垂直形变最为明显, 变化较大, 速率也较大。

蠕滑导致微裂隙闭合, 地壳形变有三部分: 一是扩容复原; 二是弹性形变回返; 三是蠕滑方向的不同形变。

形变波的传播, 则表现为所涉地点地形变有周期性变化。

应该指出, 震前应力积累引起的形变方向与震时错动方向是相反的, 而蠕滑的方向则与震时错动方向一致。

对近场形变区来说, 弹性形变, 扩容和蠕滑都将产生形变, 所以其过程比较齐全, 典型过程可表现如图 7。

蠕滑有可能多次发生, 并且速度也有差别, 因此在此阶段, 形变曲线有突变异常, 临震前, 周期较小的突跳更为明显。

对远场形变区来说, 只有弹性形变和形变波的传播可引起异常, 其典型过程如图 8。其前兆可分两个阶段, 一是弹性形

变, 二是在此基础叠加了临震前的形变波动。如果距离甚远, 在弹性形变异常区以外, 则只有短临突发性形变波动。

国家地震局新疆地震预报试验场的工作中曾提出过形变波的传播问题。指出“震源区就如一个波源, ……产生一系列从高频到极低频的形变波”, “近台异常出现早, 远台异常出现晚, 可能表明应变的传递需要一个过程。”对水准异常“近震有突变异常”“远震表现为趋势性异常”, 对基线测量, 有“伸长—缩短—发震的规律”“表现了弹

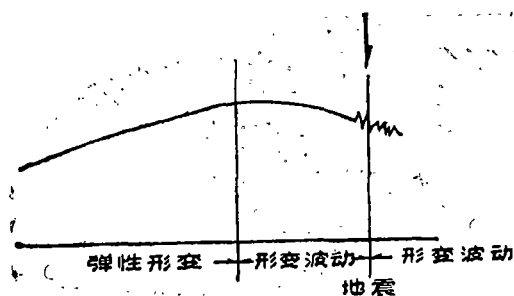


图 7 近场形变异常典型过程示意图

性形变的性质”。图9表示了一次典型的水平形变速度异常的曲线。

这些看法和现象用我们所提出的关于前兆理论的意见是不难解释的。

地倾斜观测的许多资料表明，震前地面倾斜有趋势性地朝一方向偏，临震前出现加速、转弯、打结、指向或背向震中，这些都不是偶然的，而是地形变趋势异常和形变波造成的，尤其对于超远距离的地倾斜临震异常，量值颇大，似乎用形变波传播解释比较合适。

5. 地下水位临震异常的解释

临震前地下水位上升，水压增大，油井自喷异常等现象已有广泛报导。特别令人感兴趣的是不仅震前有，而且震后也有，不仅近震中区有，而且远距离也出现类似的突发异常。

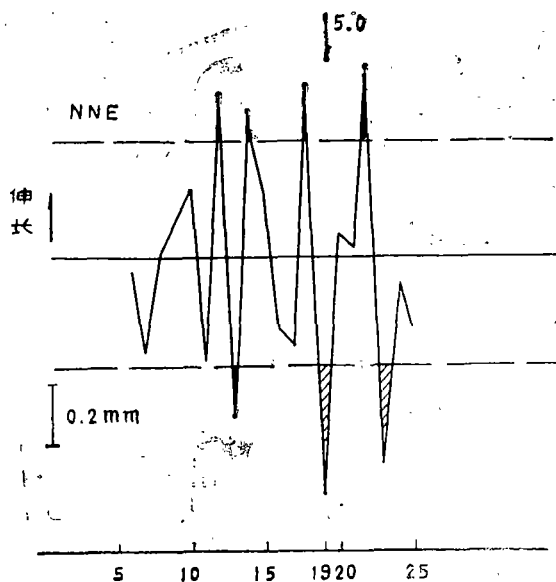


图9 1973年2月19日(苏)纳伦地震(M=5.0)前后乌什水平形变速度异常曲线

地质条件，补给源状况的改变有很大关系，在具体分析时必须搞清这些条件及其影响，否则就难以得到正确的认识。

6. 其他短临前兆的简要解释

震源及附近地区断层蠕滑和小破裂运动，将弹性应变能转化为热能、弹性波能、电磁能、化学能等。因而在近场表现出非常丰富的突发异常。如高频波的发射，可以出现超声、地声、次声异常；张性微裂隙的急速闭合张开，宏观裂缝的串通，地下深部物质的喘动挤入等等可能激发有地气、地雾、电磁波的辐射，地磁地电的强烈扰动，地光、地

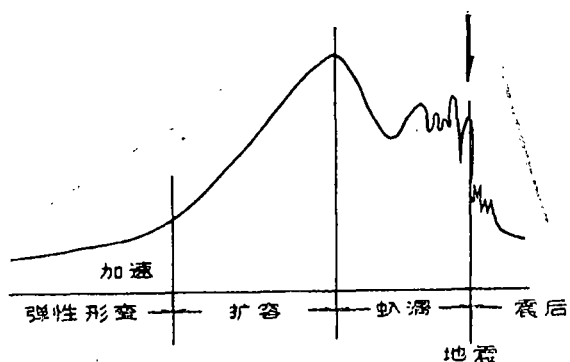


图8 远场形变异常典型过程示意图

我们认为用断层蠕滑解释上述现象比较方便。震源及附近区，由于蠕滑加速，微裂隙闭合，产生较高的孔隙压力，遂使水位急骤上升。图10表示蠕动引起地下水变化的情况。但这图未能说明裂隙闭合所起的作用。实际资料中大多数井泉是水位突然上升，并不是偶然的。

对远场来说，形变波的到达，垂直及水平向形变可造成地下水的突变，由于地下水的放大作用，其异常幅度是可能较大的。

必须说明，影响地下水位、水压变化的因素决不止形变一项，它还与水文

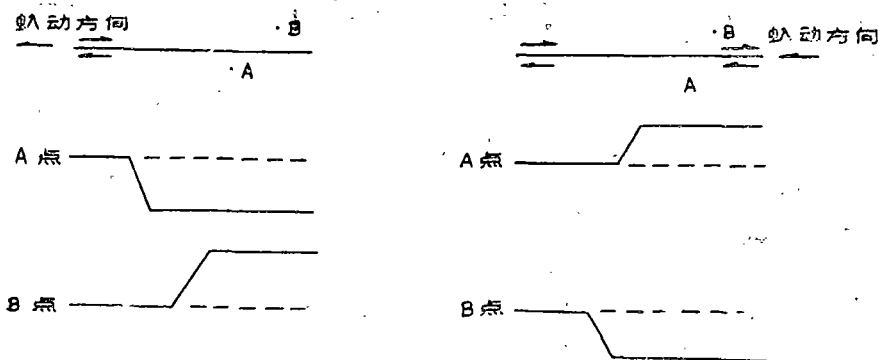


图10 断层蠕动和地下水位异常示意图

热的异常及动物行为的反常等等。

由于断层蠕滑大多从积累单元端部向中间发展，所以大量宏观、微观突发异常是从四周向震中区发展。在震中区往往出现一定阶段的“僵化”，直到大震发生前夕才出现大量的异常。

由于蠕滑可能多次分段发生，时停时滑，突发异常就可能出现几次高潮。有时裂缝扩展甚快，则突发异常发展也极为迅速，如唐山地震那样。

对远场来说，临震异常仍表现出波动性。新疆地震预报研究队工作中发现大震前远场水氡出现正负异常突跳波动，认为可能是震源辐射出的弹性波引起的突变异常。有的只出现单向突跳，可能是与每天只取一个样而漏记波峰或波谷所造成。

图11是1977年7月23日库车5.5级地震前乌鲁木齐几个水氡点的异常曲线。

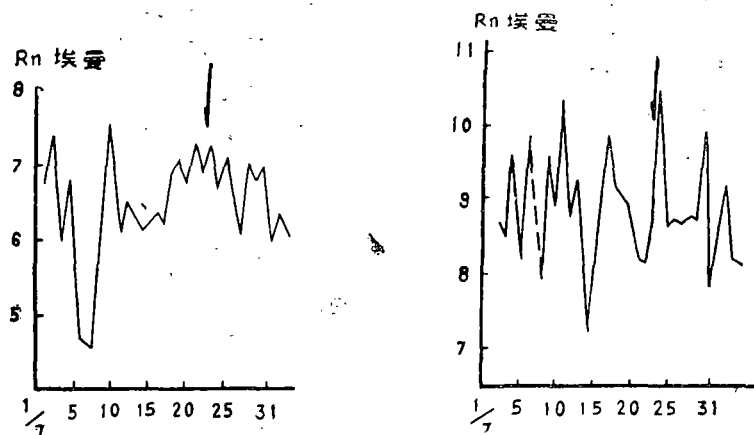


图11 1977年7月23日库车5.5级地震前后乌鲁木齐几个水氡点突发异常

7. 关于震后异常和无震异常的解释

从应力角度来看，地震错动急剧释放了大量的应力应变能，各种异常似乎应迅速消失。但实际资料表明，震后突发异常是普遍出现的，而且往往有更大幅度。我们认为，除了还有剩余应力可造成异常外，主要应从形变上去看。积累单元的快速错动，其位移量大于调整单元所让位量，就将推（挽）动上下前后的岩体，使之形变加速，从而导致某些手段近场范围内的震后异常。

调整层、调整单元的较快速度的蠕动，也可以引起异常，但不发生地震，这就是无震异常的可能原因。

如何区分短临前兆、震后异常和无震异常，还有相当的困难，有待进一步积累资料和探讨。

参 考 资 料

- [1] A·努尔 膨胀 孔隙流体以及走时比 t_s/t_p 的前兆变化 国外地震 1973年4期
- [2] C.H.肖尔茨等, 地震预报的一种物理依据 国外地震 1974年1期
- [3] В.И. Мячкин и др. Основы физики очага предвестники землетрясений, сб «Физика очага Землетрясений», М. «Наука» 1975
- [4] W.F.布雷斯 地震预报的物理基础 国外地震 1976年6期
- [5] В.Т.布雷迪 地震理论(一)(二) 国外地质 1977年2期 8期
- [6] 郭增建 秦保燕 徐文耀 汤泉, 震源孕育模式的初步讨论, 地球物理学报 1973年
- [7] 郭增建 秦保燕 地震预报中的某些力学问题 力学 1977年1期
- [8] 蜀水, 震源应力场岩石膨胀性和水的扩散作用 地球物理学报1976年2期
- [9] 罗灼礼 震源孕育过程的讨论 自然科学争鸣 1977年6期
- [10] 牛志仁 苏刚 震源孕育的追赶模式 地球物理学报 1976年3期
- [11] 牛志仁 构造地震的前兆理论 地球物理学报 1978年3期
- [12] 吴开统等 海城地震序列的特征 地球物理学报 1976年2期
- [13] 下栗田 加利福尼亚中部圣安德列斯断裂带地震序列的震源过程 国外地震 1978年1期
- [14] 秦保燕 郭增建 论层间解缚与平推型震源的断层错动(单行本) 1978年
- [15] J.B.拜尔利 R.萨默斯 高压下花岗岩中粘滑前断层面上的稳定滑动 国外地震 1978年2期
- [16] W.撒切尔 1906年旧金山地震是怎样发生的? 国外地震 1977年2期
- [17] W.F.布雷斯 粘滑的实验研究及其对地震的应用 国外地震 1973年3月
- [18] W.F.布雷斯 有关地震力学和地震预报的实验室最新研究 国外地质 1978年4期
- [19] A.努尔 构造物理学(一) 国外地震 1976年4期
- [20] C.H.肖尔茨 构造区域中的地壳运动 国外地震 1973年3期
- [21] 沙道夫斯基等 中亚某些地区强地震发生前的过程 国外地震 1973年3期