

震源顶部条件—前兆优显层的讨论

郭增建 秦保燕

(国家地震局兰州地震研究所)

前 言

在地震预报工作中,人们既期望直接观测到震源地方的情况,又期望观测手段易于实施以及干扰因素较小。但是这几个方面是不易得兼的。例如为了直接观测震源地方的情况,则探测深度就要深,此时测量手段不易实施;如观测震源在地表的间接表现,虽手段易于实施,但深部和浅部的关系不唯一,且地表干扰因素较大。在这种情况下,我们能否找到前兆显示最优越的地下深度范围呢?即在这个深度范围(层位或部位)中既能直接反映震源地方的动态,且前兆表现比较显著以及干扰因素相对较小,另外观测手段也不是很难实施。本文就是在这方面进行一些讨论,以期对今后的大震预报有所裨益。

一、震源顶部条件

众所周知,地震时所释放能量 E 的大小由以下的公式表示:

$$E = Au\bar{S} \quad (1)$$

$$\bar{S} = \frac{S_0 + S}{2} \quad (2)$$

式中 A 为释放应力的断层面积, u 为断层面上各点错动幅度的平均值, \bar{S} 为平均应力, S_0 为初始应力, S 为终止应力。对于地震预报来说,我们是要在大震发生前讨论(1)式。因之(1)式中的各参数应当具有新的含意。对于组合模式来说^[1],其中 A 是应力积累单元的断层面积, u 是调整单元在震前为积累单元断层错动所能让开的位置以保证震时有较大的错动幅度, S_0 为震前应力积累单元岩石的耐剪强度或断层面上的静摩擦极限, S 与震前调整单元的让位程度有关,如让位充分则积累单元的错动幅度大,应力释放较彻底,终止应力就小。在这里我们不去讨论上述诸因素在震前如何确定(另文讨论),我们只讨论应力积累单元在地壳上层时震源的顶部条件。

在接近地表时,由于岩石相对破碎,所以不能形成同时释放应力的巨大体积或巨大的错

层面积。另外在接近地表时由于围压低，且断层面上有液体和易滑物充填，各岩块接触面上的静摩擦极限低，这样就不能积累较大的应力。在地下更深处，例如地壳下部，虽然岩石的完整性较好，围压也大，但温度却较高，也不易积累较大的应力。只有上述两种深度之间的部位是积累高值应力的深度，这个深度大致相当于花岗岩层所在的深度（我国的浅源大震其主要释放能量的深度多在花岗岩层）。另外，从物理化学的角度可知，当岩石的酸性增多时，其粘度增大〔2〕，这也支持花岗岩层易于积累应力。因为花岗岩层是较酸性的，它的粘度 η 较大，从而松弛时间 τ 也应较大，松弛时间的表达式为：

$$\tau = \frac{\eta}{\mu} \quad (3)$$

式中 μ 为切变系数。当 τ 大时是有利于应力积累的。

根据以上所述，我们认为浅源大震应力积累区的顶部就大致是花岗岩层的顶部。当然如果古老的变质岩与花岗岩连结较好，也可算作震源顶部。在震源顶面以上则岩石比较破碎。由顶面到地表的深度各地有所不同，一般是4—5公里。

在大震发生前，震源本身所表现的动态是直接关联着大震发生的，为了地震预报，最好是探测震源体的各个部位。但是观测不同部位其手段实施的难易程度是不同的。我们认为只要探测震源顶部的动态就可达到主要目的，这就是我们提出震源顶部这个概念的目的。下面我们讨论震源顶部在前兆上的特点。

二、前兆优显层

所谓前兆优显层就是前兆显示最优越的层位或部位。它是在文献〔8〕中提出来的。下面分别进行讨论。

1. 扩容 扩容现象是一些前兆的物理基础〔4〕、〔5〕。但是扩容的程度是随围压增大而减小的。对于非完全脆性的岩石来说，扩容随围压增大而减小的更快。由此可知，扩容在震源顶部应较发育，由扩容引起的前兆应当在这个部位也较显著。应当指出的是由震源顶部向下随着深度的增加，其围压也相应递增，这样扩容程度则相应递减，于是会形成由震源顶部向下波速递增的情况。如果由地面发射地震波探测这种扩容梯度的话，则预料可在回折波中带来预报地震的信息。

2. 预滑 预滑又称预位移，它是应力积累单元断层面在临震前的一种滑动。许多临震前兆都是由它直接或间接引起的。为了把它与调整单元在震前的滑动相区别，我们把后者称为“震前调滑”。关于预滑我们在1971年讨论陕西关中震前震中区的缓慢运动时曾讨论过〔6〕。1972年美国学者肖尔茨也由1966年美国帕克菲尔德地震前震中区出现的新鲜裂缝以及1923年日本关东地震前验潮仪上记到的长周期运动提出了震前预滑的观点〔7〕。有趣的是1975年美国学者拜尔里等人〔8〕从实验指出，预滑幅度是随围压增大而减小的。他是用花岗岩样品作实验的，其中形变速度最慢的那个曲线更接近现实的地壳情况。由该曲线可知，大约在1.5—2千巴的围压条件下预滑幅度最大，这大致相当于地下4—8公里的深度。深度再增加，预滑幅度就迅速减小了，在20公里左右的深度时预滑幅度就几乎趋于零了。根据上

1) 在实验上预滑发现较早，但直接联系到地震上还只是70年代的事。

述实验，我们认为震源体上部是前兆优越显示的部位。应当指出，当预位移发生时震源区会出现应变降，这个应变降会引起以下的后果〔1〕：（1）对于组合模式来说，震前在积累单元与调整单元接壤的区域会出现相对压缩区和引张区（由于地下有大地静压力和构造压力作用，所以压缩区比引张区大）。但在临震前当显著的预滑发生时，则原来受压缩的区域其压缩程度减弱（相对于原来状态是引张），原来受引张的区域其引张程度也减弱（相对于原来状态来说是压缩）。（2）按照组合模式，调整单元在震前早期就有调滑，它的滑动因在积累单元端部受阻而在那里形成应力集中。这种受阻也使调滑受到一定的约束。但当临震前积累单元的预滑发生时，等于调整单元端部的受阻程度有所减小，因之调整单元也有相应的运动。根据以上所述，由预滑引起的临震前兆不仅在积累单元和其附近有表现，而且在调整单元也有表现。

前节已经谈到在震源顶部扩容是比较发育的，因之波速异常大，而本节已论述了大致也是在震源顶部的深度上预滑最为显著。按照我们的研究〔9〕，预滑是可使扩容裂缝闭合的，因之会使波速或波速比回返。这也就是说在震源顶部波速异常大，回返亦大，从而使波速和波速比的预报指标更为显著。

3. 流体易于突然运动 在地壳较深部由于介质比较均匀，所以应力分布也相对均匀。在此情况，驱使流体急骤运动的压力差不大，再加地壳深部围压较大，流体往往被封死，所以运动也不容易。但在震源顶部到地表之间的深度范围内介质很不均匀，裂缝穿插，大小不同和软硬各异的块体杂镶。在此情况下，应力分布极不均匀，且易发生裂缝和蠕动，因之流体可在压力差较大的情况下发生运动。特别是当临近大震前预滑发生时震源区要出现应变降，其中预滑最大的震源顶部其应变降最大，这样牵动上面不均匀的介质变动也最大，流体在这里的运动也最剧烈。上述深度是流体前兆显示最优越的部位。

4. 爆沸 所谓爆沸就是过热液体的一种突然爆炸现象。青藏高原上爆炸泉可能就是这种现象的一个例子。根据物理学的知识可知，爆沸是蒸汽压 p_v 突然大过围压 p_c 形成的。可用下式表示：

$$p_v - p_c = d \quad (4)$$

如围压大于蒸汽压，则 d 值为正，此时液体即使达到过热，也不发生爆沸。在地壳较深处过热液体被封死可能属于这种情况，如围压突然小于蒸汽压（也可能是蒸汽压突然增大），此时过热液体就要发生爆沸。在地壳浅部，例如在震源顶部到接近地表这一区间内过热液体不易被封死，所以就具有爆沸的可能性。根据（4）式，要形成爆沸既可以是增大蒸汽压 p_v ，也可以是减小围压 p_c 。在临近大震前当预位移发生时。则地壳浅部会引起变动，有的地方相对受张或是原来所受压力突然减小，即 p_c 减小，这是有利于爆沸的。另外当震源地方的预滑发生时，其花岗岩层内一些散存的高温液体被挤出上涌进入上面的过热液体中时，则因给过热液体增加热量从而增加 p_v ，因之引起爆沸。此外当予滑发生时，可能有些岩石碎粒掉入过热液体中，或是预滑引起的扰动激荡了过热液体，或是包围过热液体的壁上产生裂隙，使壁内放射性穿透系数增大，从而有带电离子打入过热液体形成汽泡核等皆可引起爆沸。当上述爆沸发生时，可引起地声、地下水动态、水温、水化、地汽等前兆。而且由于爆沸带有突然性，所以引起的前兆就带有突跳性。至于过热液体存在的可能性，我们认为这是由于沉积层导热性差，所以深部热流到达震源顶部与沉积层的交界地区时就会聚热，从而使那里的液体达到过热。再者，由于这里的液体不易受地表的扰动，处于相对静止状态，这也是有利于

液体达到过热的。我国许多大震的前兆就具有突发性，异常幅度大等特点。

下面我们以视电阻率作为一个例子来讨论它与优显层的关系。

根据文献^[10]的报导，在苏联加左尔—察什马—维萨塔地区用偶极法观测震前、震后的电阻率发现勘探深度为6公里左右的在震前电阻率变化大，而较浅的1400米和800米深度上的电阻率在震前、震后没有观测到任何变化，如图1和图2所示。这一实测结果意味着在震前深部比浅部的电阻率变化更为显著，这也与上述优显层的观点相一致。

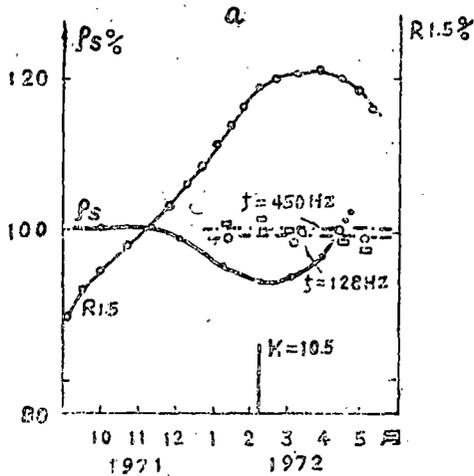


图1 视电阻率 ρ_s 和土壤层电阻 $R_{1.5}$ 随时间变化

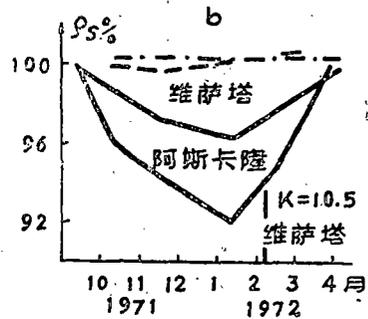


图2 直流(实线)和交流128及450 Hz测深(虚线)时岩石电阻率的观测变化

以上就是我们认为地下前兆显示最优越的深度，我们称其为“前兆优显层”，它大致在地下4—8公里的深度上。在这里地面干扰(包括振动干扰、水干扰、电流干扰、污染干扰等)也大大减弱。因之今后应大力测探和研究上述深度内的前兆变化，这可能对实现地震预报是有益的。

值得指出的是，在大地震前在较远距离上也往往观测到前兆现象，人们把它称之为“超距前兆”。这种前兆产生的原因目前还不清楚。根据前面我们对“前兆优显层”的讨论，震源顶部优显层中包含有高压水，并且有连通的小裂缝存在。如果这种裂缝曲折互通达及较远，则震前震源地方的动态变化将通过这一连通的高压水层传递到较远的地方，并引起较远距离的前兆。目前，地下核爆炸深度以及所产生的余震一般也超不过上述的前兆优显层。因此核爆炸后所造成的大范围小震频度加大^[11,12]也可能与上述高压水传递能量触发小震发生有一定的关系。

三、今后探测前兆优显层的手段

针对探测上述前兆优显层，我们认为以下手段是值得重视的。

1. 人工地震测深 这个方法是物探上比较成熟的方法，它可测探前兆优显层中的变化。用可控震源和人工爆炸皆可。

2. 大地电磁测深方法 这个方法在国内许多地方已取得了工作经验。用它可测量前兆优显层中电阻率的变化。

3. 深钻孔 在深钻孔中进行测震观测，已往人们已作过，那时主要是考虑避免干扰。从我们所论述的前兆优显层来看，更支持了在深钻孔中观测前兆变化（不限于测震）的前景。

4. 深部来源的泉点观测 这是人们已采取的水化学和水动态观测方法。同样也是探测前兆优显层中变化情况的方法，但只有选择来源深的泉点，方能反映前兆优显层中的变化。

四、震源顶部条件的讨论

前已述及由震源顶面到地表，其间介质破碎，流体穿插，岩石强度不高。从这个意义讲，它属于调整单元的性质。当大震发生时断层错动由深部传至其内时，这个调整层的介质就相应进行调整以容纳深部传来的错动幅度。由于调整作用较复杂，所以地表显示的断裂变形也比较复杂。又因各地区情况不同，即使同样震级和同样深度的地震，其在地表所表现的断裂长度和错动幅度也不相同。我们认为震源地方的断裂长度和错动幅度经过上述调整层而传到地表时一般是变小了，特别是对于平推错动。所以不能简单的用地表表现去等同震源地方的情况。在同样震级的各地震中。其地表断层最长者最接近该类震级地震的震源断层长度。

（本文1981年8月29日收到）

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] A. C. 金兹别尔格 实验岩石学 孙管译 地质出版社 1957
- [3] 郭增建 秦保燕 李海华 徐文耀 西北地震学报 1期 1979.
- [4] A. Nur, B. S. S. A., 62: 1217, 1972.
- [5] C. H. Scholz, L. R. Sykes and Y. P. Aggawal, Science, 181: 303, 1973.
- [6] 兰州地震大队 某些震源问题的讨论, 地震战线, 8期, 1971.
- [7] C. H. Scholz, P. Molnar and J. Johnson, J. G. R., 77: 6392—6406, 1972.
- [8] J. D. Byerlee and R. Summers, Pure and Applied Geophysics, Vol 113, №1—2, 1975.
- [9] 国家地震局兰州地震大队综合分析预报研究室, 地震前纵横波速度比回返原因的讨论, 地震战线, 4期, 1975.
- [10] O. M. Барсуков, Электропроводность Горных пород и Землетрясения Земля и Вселенная №6. 1979.
- [11] C. M. Emiliani, C. G. A. Harrison, M. Swanson, Science, 165: 3899, 1969.
- [12] J. H. Healy, P. A. Marshall, Science, 169: 3941, 1970.

ON THE CONDITION OF THE EARTHQUAKE SOURCE TOP—
THE PRECURSOR ADVANTAGEOUS LAYER

Guo Zeng-jian Qin Bao-yan
(The Seismological Institute of Lanzhou)

abstract

In the earthquake prediction, people not only expect to observe directly the change of source, but also to do the practice of observational method much easier. At the same time one requires the disturbance factors are small. This paper discussed the top case of shallow great earthquake. According to practical data, the information of precursors is very obvious in this depth. It is an advantageous layer for observing precursors. Because the source of shallow great earthquake is located in the granite layer, the top of source is between the bottom of deposit layer and the top of granite layer, about 4—8 kilometers from surface. In such depth, the confining pressure is low, therefore, the dilatancy, the stable sliding on source fault plane and the fluid move preceding great earthquake are very obvious, but the disturbance from earth surface is not large in this depth.

On the other hand, an anomaly low resistivity layer, which contains much water with high temperature and certain pressure exist between the granite layer and deposit layer. In some places of the layer the fluid is in a superheat state—an unstable state. when some changes from the source arrive there, the superheat fluid will explode. Thus it will lead to the amplification of the message from the source and to sudden change of precursor. Therefore, we call it precursor advantageous layer. In future, it is very important to put the instrument of observation in such a layer for measuring the message from the source.