

由地震时震中区的显著下沉讨论 震源的底部条件

秦保燕 郭增建

(国家地震局兰州地震研究所)

根据震源机制的研究,我国绝大多数的破坏性地震发生在介质比较脆性的上地壳中(可称为孕震层),其断层面比较陡直,且以平推错动为主^[1]。对于这种类型的震源,地震时其震中区的垂直形变应当是不显著的。然而实际上我国一般大地震时极震区及其附近都有大面积、大幅度的下沉,其下沉的幅度和范围不能完全用震后地下水的排出得到解释。显然在震时,震源的底部已经存在着下沉的条件,它使震源断层盘体在平推错动的同时向下塌落。本文拟通过邢台、辽南和唐山等大地震震源底部的低阻层环境并结合垂直构造力的作用来讨论这个问题,并进而讨论一些与地震预报有关的问题。

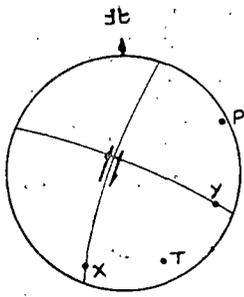
一、 大震的平推错动和震中区的下沉事实

近十多年来,在我国境内频繁地发生强烈地震。在有大地测量资料的地震区,发现地震时震中区及其附近出现大面积、大幅度的地面下沉现象,其下沉量有的竟达震前地壳垂直形变的几十倍。但另一方面,这些地震的震源机制表明,震源断层的错动却是以平推占优势的。下面仅举考察研究比较详细的邢台、辽南、唐山三个大震的震源机制资料 and 大地测量资料来予以说明。

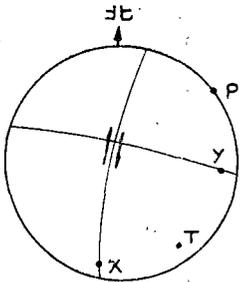
1. 邢台地震 1966年3月8日和3月22日在河北省邢台地区先后发生了6.8级和7.2级地震。这两次大震的震中位置相距一定距离,其震源机制结果基本上都属平推性质^[2],如图1所示。参考余震分布区的长轴方向,可确定发震断层走向为北北东向。根据大地测量结果,3月8日大震和3月22日大震发生时其震中区分别出现大幅度下沉^[3],如图2中的虚线所示。3月8日震中区最大下沉量为27厘米,3月22日震中区最大下沉量为44厘米。在图2中的实线表示升区,其上升量与下沉量相比是微不足道的。

2. 辽南大震 1975年2月4日辽南海城发生7.3级大震。这次地震的震源机制结果表明^[4],震源断层面是属平推性质的,断层面比较直立,如图3所示。对比余震分布长轴方向可确定其发震断层的走向为北西西向。但大地测量结果表明,地震时在极震区及其附近出现了相当显著的下沉^[5],如图4所示。最大下沉量为14厘米,另外在极震区西南的营口市附近还有一个下沉中心,最大下沉为26厘米。按照文献^[5]的解释,这里下沉大可能还与表层土松软有关。图4中的等值线以毫米为单位。

3. 唐山大震 1976年7月28日在宁河至迁安地区发生了一次7.8级大震。这次地震的



1966.3.22 邢台7.2级地震节面解
(上半球投影)



1966.3.8 邢台6.8级地震节面解
(上半球投影)

图1

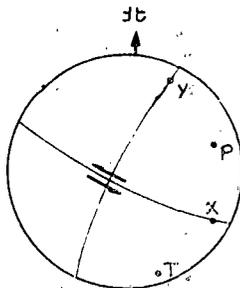


图3 1975.2.4 海城7.3级地震节面解
(上半球投影)

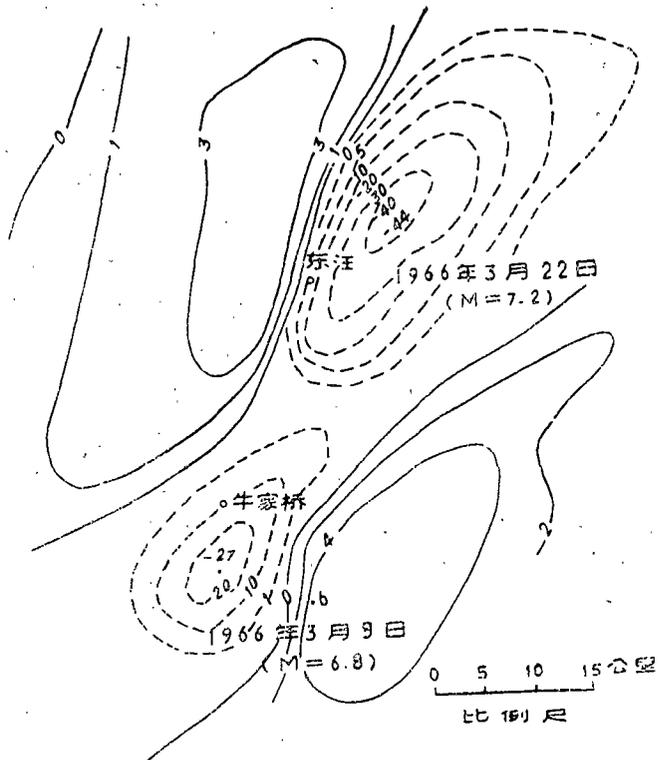


图2 1966年3月8日和3月22日大震前后(1965-1966.4-5)震中地区地面垂直形变等值线图
(等值线以厘米为单位)

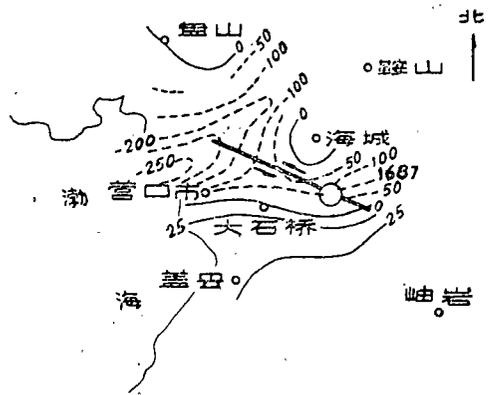


图4 海城地震震后垂直形变图
主震 ○ 前震

震源机制结果表明,震源断层面是属平推性质的,其断层面接近直立^[6],如图5所示。对比其余震分布长轴和极震区长轴,可以确定震源断层走向为北东向。但是与前两个地震一样,大震时在震中区及其附近出现了大幅度大面积的地面下沉^[7],下沉中心有两处,其下沉幅度分别为150厘米和100厘米。至于上升区的上升幅度是很小的,最大上升

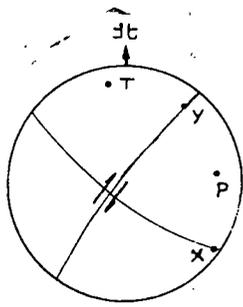


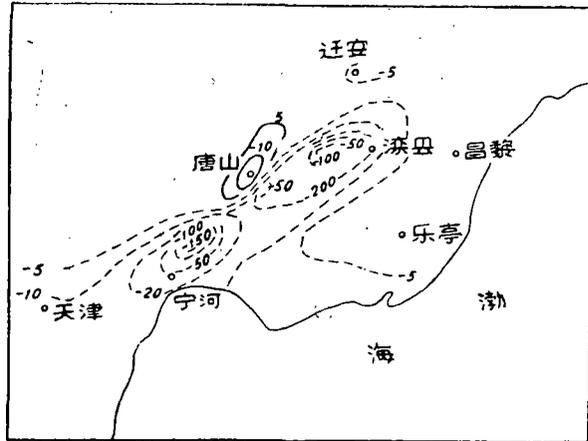
图5 1976.7.28 唐山7.8级地震节面解 (上半球投影)

幅度约10厘米，仅为最大下沉量的1/15。

由以上三个大震震中区的大地测量资料可以看出，震中区的大面积下沉有的是断层双盘都有一定下沉，有的则偏于一盘。1966年邢台大震和1975年的辽南大震大致属于前者，1976年的唐山大震大致属于后者。

按照目前的大地构造运动学说，太平洋板块对华北地区传递来强大的水平挤压，其方向近乎东西。这种力源能很好地解释邢台、辽南和唐山大震的水平错动以及其旋性特征，因之它是孕育地震的主要力源。但是它对这种大幅度下沉是不好解释的。而且辽南和唐山大震的震源机制资料还表明，断层错动除平推占优势外，还有正断层分量，如所周知，水平挤压只能压出逆断层，而不能形成正断层，这只有用地壳深部存在着向下的垂直运动来解释。但是地壳的垂直运动一般认为是缓慢的，它为何在震时表现出急剧下沉呢？比较合理的解释是：在震前这种缓慢的地壳垂直运动已在孕震层的底部造成了容纳下沉岩体的空间（拉松区），地震时孕震层主要在水平剪切力的作用下发生平推式的破裂错动，与此同时，岩层的整体性受到破坏，它不能支撑本身的重量，因而产生了急速的下沉。这就是说平时的缓慢垂直运动已变成了突然的垂直运动。

按照目前的大地构造运动学说，太平洋板块对华北地区传递来强大的水平挤压，其方向近乎东西。这种力源能很好地解释邢台、辽南和唐山大震的水平错动以及其旋性特征，因之它是孕育地震的主要力源。但是它对这种大幅度下沉是不好解释的。而且辽南和唐山大震的震源机制资料还表明，断层错动除平推占优势外，还有正断层分量，如所周知，水平挤压只能压出逆断层，而不能形成正断层，这只有用地壳深部存在着向下的垂直运动来解释。但是地壳的垂直运动一般认为是缓慢的，它为何在震时表现出急剧下沉呢？比较合理的解释是：在震前这种缓慢的地壳垂直运动已在孕震层的底部造成了容纳下沉岩体的空间（拉松区），地震时孕震层主要在水平剪切力的作用下发生平推式的破裂错动，与此同时，岩层的整体性受到破坏，它不能支撑本身的重量，因而产生了急速的下沉。这就是说平时的缓慢垂直运动已变成了突然的垂直运动。



比例尺 1:300万 上升区 下降区
图6 唐山大震前后(1975-1976)震中区地面垂直形变图(等值线以厘米计)

二、震源底部拉松状态的形成条件

如果地壳上部和下部介质的性质完全一样，是一个牢固连结的整体，那么垂直构造运动只能驱使地壳作整体的缓慢运动，不可能在上部地壳和下部地壳之间形成拉松状态。但如果上部和下部地壳之间有软弱层面存在，深部的地壳运动就有可能使上部和下部地壳运动产生不一致，并在上下层之间形成拉松区。由此可知，地壳内软弱层面的存在是地震时震中区突然大幅度下沉的条件之一。据目前所知，这个软弱层可能就是地壳中的低阻层或低速层。下面仍举邢台、辽南、唐山地震震源底部的低阻层或低速层来加以讨论。

1. 邢台大震底部的低阻层 1966年邢台大震后其余震的垂直剖面表明〔8〕，震源体的底部大致在25公里左右，因为在这个深度之下余震突然减少，如图7所示。根据人工地

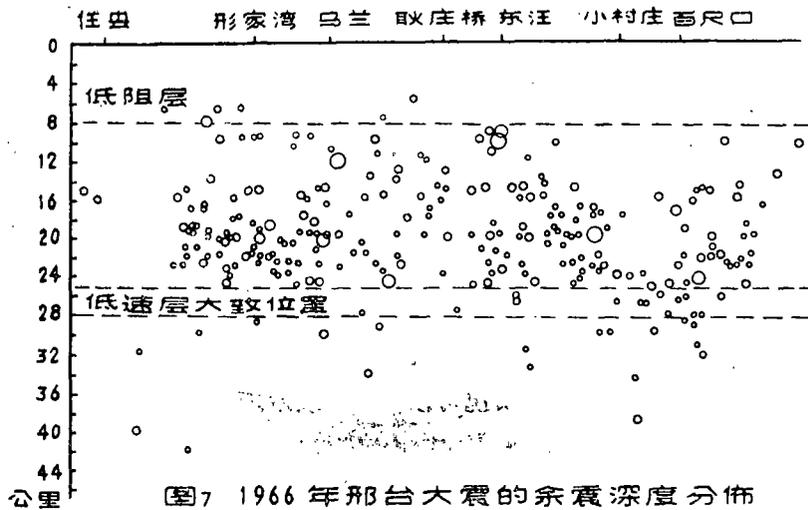


图7 1966年邢台大震的余震深度分布

震测深的研究〔9〕,在25公里附近有一低速层。大地电磁测深的研究也表明,在深于震源深度的位置上有低阻层存在〔10〕。上述低阻层或低速层都是地壳中介质相对软弱的地层。

2. 辽南大震底部的低阻层 1975年辽南大震后其余震的垂直分布剖面表明〔4〕,余震基本上分布在15公里的深度以上,再往下余震就几乎没有了,因此这是辽南大震震源体底部的深度。另一方面根据大地电磁测深的研究,发现在辽南地区地壳内的低阻层在15~20公里的深度上〔11〕。这个深度恰好与辽南大震震源底部的深度相符,如图8所示。

3. 唐山大震震源底部的低阻层 根据张之立同志收集的资料,唐山地区12个4.7级以上地震(震级范围:4.7~7.8)的震源深度均不超过24公里。因此可以认为24公里深处可能就是唐山大震的震源底部。遗憾的是唐山地区未进行过大地电磁测深工作,因而低阻层的位置不得而知。但北京附近地区的大地电磁测深结果表明,在地下20公里的深度附近普遍存在低阻层〔12〕,如果把把这个低阻层深度推延到唐山地区,则大致也位于唐山地震的震源底部附近。

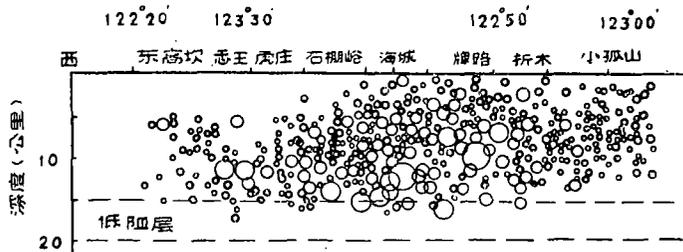


图8 海城地震余震剖面图

由以上三个大震的实例可知,震源底部是存在低阻层或低速层的。在这种层中电阻率仅为几个欧姆一米,而相邻层中的电阻率要高出这个数值几个量级。上述低阻层的介质状态目前一般认为是这里的介质处于高温和多水状态,它属于地壳中的软弱层。余震不越过此界也证明了该层的软弱性。但是震源底部的低阻层即软弱层面并不能直接在震时引起发震断层的下陷。它的作用仅仅是使孕震层与下部地壳之间连系不牢。如果没有

垂直向的地壳运动，那么孕震层发震后震中区将不可能出现大幅度的下沉。但是当地壳深部某一时间有垂直向下的运动发生时，低阻层（即软弱层）由于与上部坚硬岩层的连结不很牢固，它不能把上地壳也拉着同时下沉，因而产生了上下地壳之间的脱离。此时下地壳的下沉运动将单独发生，从而使震源底部出现明显的拉疏区，并为震时孕震层的下落准备了条件。我们把这种层间解除束缚的现象简称为层间解缚^[13]。

三、震源底部解缚对平推型震源的影响

前已述及，地壳上部的脆性介质（孕震层）处于强大的水平压力作用下，在它的底部经常有下部地壳支撑着。如果某一时间垂直运动（能源来自上地幔）使这个支撑削弱，则就会形成层间解缚，其大致情况可以由图10表示。其中图10a表示层间解缚位于孕震断层的正下方；图10b是层间解缚偏于孕震断层的某一侧。按照文献^[14]的研究，平推型震源的最大主应力 P_1 和最小主应力 P_3 位于水平面内，中等主应力 P_2 在铅直方向内，震源底部的解缚相当于中等主应力减小。按照日本学者茂木清夫的实验，中等主应力减小时，震源断层面的耐剪强度 L 将会减小。其公式是：

$$L = f\left(\frac{P_1 + P_3 + \alpha P_2}{2}\right), \quad (1)$$

式中 α 约等于0.1。从(1)式可以看出 P_2 减小使 L_2 减小。因之大震有利于在解缚时发生。至于层间解缚时上下两层面之间的水平剪切应力也有所解除，其对平推型震源的影响尚须进一步讨论。

在图10b所示的情况，即偏于某一断层盘的底部解除约束。震前在重力作用下可使某单盘轻微下沉，它使断层面上增加了向下的垂直向剪切应力 \bar{V} ，这个剪切应力与原来的平推型剪切应力 \bar{H} 可以相加（因为它们作用于同一平面内，且在同点上叠加），即

$$\bar{Q} = \bar{V} + \bar{H} \quad (2)$$

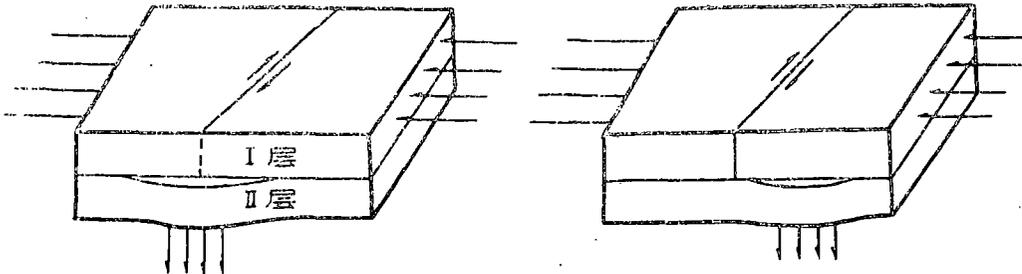


图10a

图10b

这时合成的剪切应力 Q 显然是增加了。这种情况是有利于地震发生的^[14]。

值得进一步指出的是：由于孕震层底部的解缚，孕震层在自身重量的作用下也会作一定程度的向下挠曲。其挠曲的程度取决于水平挤压力的大小和孕震层本身的岩石强度。当挠曲发生时，孕震层的底部将不同程度地受到引张，并形成垂直于水平层面的张性微裂缝，这些张性微裂缝的进一步贯通可形成张裂缝，它们将直接削弱岩石强度并使震源越来越趋向于不稳定状态，从而促使主震的发生。另外临震前平推断层面上的予滑加速也可能会促使孕震层的挠曲加速。总结以上所述可以认为地壳深部缓慢的垂直下沉运动所

引起的层间解缚在后果上是有利于平推型震源发震的。

在震时和震后平推型震源破裂错动下陷将产生如下一些次生现象。

1. **地震时极震区的喷沙冒水** 地震时震中区及其附近急剧下陷并伴有强烈挤压，遂使地下水比较丰富的地区产生喷沙冒水现象。1966年邢台地震和1976年唐山地震时均在极震区出现比较严重的喷沙冒水现象。海城地震后的地气炮（地面鼓包放炮现象）也可能与极震区上部地层受挤有关。

2. **余震区分布带宽度大** 如果主震是纯沿一个断层面作平推错动的（断层面比较陡直）那么余震带是不会宽的。但实际上的余震带很宽。对于这一现象只要考虑到解缚面积就不难理解了，即在一个水平应力场中，如有一定面积的解缚和垂直下塌作用产生，则类似公式(2)所述的道理可在极震区一定范围内引起许多次生破裂和错动，从而使余震区宽度加大。例如1966年邢台地震的余震区长轴达100公里，而短轴竟达50公里宽；1975年辽南大震后余震区的长轴为70公里，而短轴的长度达30公里；1976年唐山大震的余震区长轴为140公里，其短轴为50公里。对比以上三个大震的余震区范围和大地测量所发现的下沉区范围，它们的宽度大体上是一致的。

3. **余震的持续时间与地面下沉趋于稳定的时间相一致** 例如邢台地震后地面垂直形变的主要特点是“在主要强震产生的强烈下沉区，地震后仍继续下沉，震后地形变延续的时间与余震的衰减是基本一致的。……强震后的下沉主要集中在1966年4月—9月，这也是余震的强度频度衰减最快的时期”〔3〕。这一现象说明地震时震源断层盘体下沉到紧贴下部地壳（即把拉松区填实）需要一个时间过程，而余震中的一部分显然反映了这一调整的时间过程的，当下陷的破碎的块体各自调整到位能最低的地方，则余震就趋于结束。

4. **主震的始破裂点不总是在震源体端部** 在大震发生时，用地震波定出的震源深度是主震的始破裂点，它往往在孕震层的下部并由此点开始向上和向周围传播。所以一般大地震其震源深度较深，且一般为不对称的双侧破裂。

应当指出，层间解缚还可能还有其他形式，例如水平力挤压地壳上部有可能使该层向自由面上拱，因之形成地壳上部和下部脱离（解缚），关于这种情况日本学者檀原毅等人在讨论松代地震时曾经提出过〔15〕。

四、层间解缚所引起的前兆现象

前已述及，层间解缚是可以促使地震发生的，同时层间解缚后由于孕震层向下挠曲，也会引起一些可能的前兆。

1. **震前地下水的变化** 如前所述，临震前孕震层在重力作用下的小幅度向下挠曲将使震中地势变低，同时该处地层上部会受到挤压。因此震中区和其附近一定范围内地下水位多为上升，外围地区地下水将下降。1966年邢台、辽南、唐山大震前震中区和其外围区地下水的变化就是这样的〔16, 17, 18〕，它符合上述的推断。当然大震前平推断层面上的予滑也是引起地下水变化的原因之一，其变化的图案将与上述不同。因此叠加后的图案可能带有某种程度的复杂性。

2. **前震的震源深度较深** 由于孕震层在重力作用下发生向下挠曲，所以震源底部将

有一定的张力作用。文献〔4〕曾指出,当断层面上有张力作用时是有利于发震的,因此前震的位置应当靠近震源底部。例如1975年辽南大震前,前震的深度就比较深〔4〕。1963年广东新丰江6.4级地震前也发现前震的震源深度有加深现象。值得指出的是辽南大震的前震位置不位于震源体的端部,而位于震源区偏中部的位。且前震的位置与下沉中心大致一致,如前边图4所示。这一点也支持上述观点。

3. 震中区的波速异常和波速的回返 在震前时期孕震区的脆性介质中会产生大量的扩容裂缝。但当解缚发生后,孕震层下拗,上部地层因挤压而使一些扩容裂缝闭合,在震源底部开始出现张裂缝,低阻层的高温水体有可能注入,这时临震前的波速比会出现急速回返。由于震源底部张裂缝的迅速发展以及高温水的注入都促使孕震区岩石强度降低,因而波速异常的急剧回返将标志着大震的来临。根据研究〔19〕,1975年海城地震震源区出现波速下降是在临震前几天内发生的,这可能是临震前孕震层急速下拗时底部张性裂缝快速发育,深处热液来不及喷入引起的,待热液喷射入张裂区后,波速急剧回返,大震也就发生了。

4. 震源底部的低阻层可能会增厚 由于上述低阻层的热液向震源底部的张性裂缝注入,所以低阻层的范围向上扩展。如果真是这样,则地震前后可能会观测到低阻层变厚现象,并相应引起地磁场的变化。另外由于解缚作用,震前可能在震中区和其附近出现重力负异常,震后回返。

以上是震源底部解缚可能引起的前兆现象。它与地壳中部低阻层的存在密切相关。还应指出,人们往往发现震源体上部离地面不远的地方(一般在几公里)也有低阻层。这个低阻层大致位于沉积层的基底部位,在那里可能有过热液体存在,因之大震前予滑或下拗运动引起的扰动有可能使过热液体暴沸,从而引起一系列突发性前兆,关于这部分内容我们将另文讨论。

结束语 关于地壳中的层面与地震的关系,已往很少有人注意,1973年张文佑等同志首先指出了这个方向〔20〕。1977年我们在文献〔13〕中对此进行了一些讨论。由于地壳深处目前掌握的情况还少,本文的讨论是极其初步的。至于目前发现震源区下方有隆起的构造问题,我们认为它与解缚并不矛盾,因为前者是长期地壳运动的结果,后者是短时期的结果。

参 考 文 献

- 〔1〕 郭增建 姜秀娥 用震源机制资料讨论我国境内现代构造运动 中国地球物理学会 1963年学术会议论文集 科学出版社 1965年
- 〔2〕 李钦祖 王泽皋 贾云年 靳雅敏 由单台小地震资料所得两个区域的应力场 地球物理学报 1973年 16卷
- 〔3〕 国家地震局地震测量队 1966年邢台地震的地形变 地球物理学报 1975 18卷 3期
- 〔4〕 吴开统等 海城地震序列的特征 地球物理学报 1976 19卷 2期
- 〔5〕 国家地震局地震测量队 海城7.3级地震的地形变 地球物理学报 1977年10卷 4期
- 〔6〕 邱群 1976年7月28日河北省唐山7.8级地震的发震背景及其活动性 地球物理学报 1976年19卷 4期
- 〔7〕 国家地震局地震测量队 唐山7.8级地震的地壳垂直形变(油印本) 1977年12月

- [8] 何志桐等 邢台地震系列的空间分布、构造应力场及其发生过程的探讨 地球物理学报
1977年20卷2期
- [9] 腾吉文等 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(一) 地球物理学报 1974年17
卷4期
- [10] 兰州地震大队 用电磁测深法预报地震 地电预报地震工作会议资料汇编 1971年
- [11] 邓起东等 关于海城地震震源模式的讨论 地质科学 1976年3期
- [12] 刘国栋 华北部分地区上地幔电导率异常及其意义(油印本) 1978年11月
- [13] 郭增建 秦保燕 地震预报中的某些力学问题 力学 1977年1期
- [14] 郭增建 秦保燕 张远孚 黎在良 从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的孕育
和发生 地球物理学报 1977年20卷3期
- [15] 檀原毅 松田时彦 地震与地壳变动 《地震》 1967 20卷4期
- [16] 卞斌 邢台地震前的地下水异常 地震战线 1978年3期
- [17] 丹东市地震台 海城地震的地下水异常特征 地震战线 1976年2期
- [18] 唐山地震工作队 唐山地震的地下水变化 地震战线 1977年3期
- [19] 冯锐等 海城地震前后地震波速比的变化 地球物理学报 1976年19卷4期
- [20] 张文佑等 从断块错动和层间滑动初步探讨震源空间分布和震源力学状态的关系 地质科
学 1973年4期