

兰州地震研究所
科研成果汇编

(一九八一年)

情报资料室

前 言

科学技术研究成果是广大科学技术工作者的劳动结晶，是全国人民的宝贵财富。管好用好研究成果，对于在我国社会主义建设中实现“四化”，赶上世界科学技术先进水平，具有重要意义。

为了更好地交流和推广研究成果，调动科学研究人员的积极性，经局（所）党委批准，我们从今年开始编辑了《一九八一年科学技术研究成果汇编》。按照国家地震局及我所下达的一九八一年科研计划已完成的四十个科研课题，经所学术委员会鉴定后，本汇编选取了十八个课题中的46篇论文（其中重大成果一篇，重要成果八篇）。分别归纳为：地震学理论及实验研究、地震预报及前兆研究、地震地质研究、地震工程及防震抗震、地震观测及台站建设、仪器研制及计算机应用等六部分。其余两课题即《甘肃省地震台网观测报告》和《甘肃省强震目录（修订）》因系资料性质，我们认为单独出版更为适宜，故未予编入。

本《汇编》在编委会指导下，由情报资料室负责编辑（文字审阅：刘万忠、胡新原，绘图：刘显枝、冯爱敏、赵玉珍、艾志莲），由于水平有限，难免有错误之处，望读者批评指导。

兰州地震研究所情报资料室

一九八二年九月

目 录

地震学理论及实验研究

论我国境内垂直力的独立存在和其在地震预报中的应用·····	(1)
自然条件下受压岩(土)层电阻率变化的实验结果及大地震前后地电阻率某些 异常特征的初步分析·····	(23)
围压条件下岩石电阻率变化与应力途径和应变速率的关系·····	(35)
一种强余震发生的断裂力学讨论·····	(43)
震前予滑的有限元分析·····	(48)
孕震介质中地震波动力学特性的前兆异常变化·····	(57)
弱震分布与续发性地震的关系·····	(79)
一九七六年松潘—平武地震前的中强震·····	(86)
大震前震源外围区高b值震群产生的一种物理机制·····	(92)

地震预报及前兆研究

南北地震带和滇西地区多次七级强震前地下水中氡含量的变化·····	(101)
兰州地磁正常变化的分析·····	(118)
古浪—海源断裂带“无震异常”的意义·····	(131)
模糊数学方法在地震综合预报中的应用·····	(135)
兰州、平凉地区地形变试测报告—兼论垂直形变流动测量·····	(150)
震级标准与地震预报·····	(156)
γ 法测氡及在地震预报中的应用·····	(160)
β 测氡法·····	(176)

地震地质研究

中国大陆微破裂过程及其应力图案的变化·····	(184)
甘肃龙首山地区现代构造应力场与地震关系研究·····	(200)
河西走廊地质构造地壳结构特征与地震·····	(237)
利用磁变测深探讨南北地震带北段深部构造特征·····	(253)

地震工程及防震抗震

兰州、天水市区建筑场地抗震区划·····	(269)
湿陷性黄土的强夯震动观测·····	(302)

地震观测及台站建设

对兰州台 M_s 震级偏差的分析·····	(311)
-------------------------	---------

甘肃省测震台网基本观测条件及评议·····	(318)
兰州重力比较基线场建场报告·····	(334)
用于天然水地震水化观测的离子选择电极分析操作规程(摘要)·····	(341)
宝鸡水氦异常的原因·····	(350)
中国—比利时王国重力固体潮观测研究——兰州对比观测资料处理与结果·····	(358)
甘肃省水化观测点考察报告·····	(376)
甘肃省地电台址条件研究报告·····	(383)
地震预报工作中水氦测量的几点改进·····	(392)

仪器研制及计算机应用

JZD—1型自动测氦仪研制报告·····	(397)
地电测量中的干扰和抑制·····	(419)
电信传输地震台网计算机系统可靠性的几个问题·····	(427)
模糊数学在地震研究中的常用算法·····	(447)
联调地震台网预处理计算机系统有关技术问题·····	(463)
DJS—131计算机的故障分析与检修实践·····	(481)

论我国境内垂直力的独立 存在和其在地震预报中的应用

秦保燕 姚立珣 荣代潞 徐纪人 李亚荣

前 言

六十年代后期, 板块学说问世, 它以强有力的论据战胜了已有的学派。随后我国地学工作者也用太平洋板块和印度板块对中国地壳的水平挤压来解释我国的构造运动和构造应力场。按照这个观点, 水平挤压是我国的构造力源, 而地面上看到的垂直运动是次生的。对于地震的形成来说也只强调水平压应力。在此情况下五十年代盛行一时的苏联垂直学派已消声匿迹了。然而近年来的大震事实表明, 在大地震前后震中区及其附近地区存在着明显的垂直运动, 这种纵横尺度相近的局部隆起或下沉很难用大范围的区域压应力场得到完满的解释(例如海城大震区附近的庄河隆起, 唐山附近的阴山隆起, 渤海下沉等)。因此我们认为在我国存在垂直力引起的有关地壳运动, 这种垂直力不是由地壳的水平构造运动派生的。本报告用我国几百个震源机制资料(作者曾是处理这些资料主要参加者)去鉴定, 结果发现有一半地震其震源机制以平推为主外, 还兼有正断层错动分量。这种兼有正断层分量的地震, 是不能单纯用水平挤压来解释的, 因为水平挤压不能产生正断层分量。因而在我们承认板块学说的水平挤压观点的前提下, 还必须考虑上地幔对地壳所施加的垂直力(如上升、下降, 垂直差异运动)。对地壳这种受力体来说, 上述垂直力不是水平挤压力的次生物, 而是独立作用于地壳的。由于平推兼正断层震源散布我国境内, 因此不同形式的垂直力在我国是普遍存在的。

根据上述的研究, 在我们研究地震预报的过程中不仅应当考虑水平力在孕震和发展过程中的作用, 而且必须同时考虑垂直力的作用。1979年我们曾用水平力和垂直力的相互作用提出过地震孕育和发生的层间解缚模式, 本报告用水平力和垂直力的联合作用解释大震前的空区现象。关于空区前人已发现很久了, 但其形成机制, 至今无定论。特别是空区比震源体大得多的空区类型和随时间变化的空区图象很难用变化不大的稳定的水平应力场解释。本报告用上地幔的垂直运动作出了物理解释和理论计算。

(一)

大震前震源区的确定

与大空区形成的物理机制

震源组合模式表明, 一个震源的形成必须具备应力积累条件和应力释放条件, 因此, 震源端部必须存在岩石强度小或摩擦阻力小的弱介质区段。在大区域构造应力场的作用下, 弱介

质区段由于不能承担很大的应力而把应力转移到邻近岩石强度高的地方去,在那里积累应力形成震源。因此,在一个大地震发生之前,中强地震活动将首先发生在弱介质区段,而中强地震的围空区或空段就是未来大地震的震源区。在组合模式中,前者称为应力调整单元,后者称为应力积累单元。在实际中,有一类空区是符合组合模式的,但还有一类空区面积相当大,它们往往比实际的震源体大得多。以上这两类空区在地震预报中均有重要参考价值。然而,目前在确定空区时还存在一定的不定性,对地震空区的成因特别是大空区形成的原因探讨甚少。为提高地震空区的可靠度,本文提出了一种地震空区的动力检验方法,并根据我国部分震例探讨了地震空区与应力积累单元和应力调整单元的关系最后对两类地震空区的成因进行了一定的探讨。

一、大震前的地震空区及应力调整单元与积累单元的确定

如所周知,在一个稳定的、变化不大的区域应力场作用下,应力积累单元和应力调整单元要在较短的时间内显示其地震活动特征是比较困难的。如果用某种快速作用的力源突然加到某一地区,则这一地区便会产生新的应力并进行应力调整。由于地壳介质的不均匀性,这种应力调整活动将首先在弱介质区段表现出来,如出现一系列中强震活动,按照组合模式,这些中强地震活动的区段是应力调整单元,而由这些地震活动所显示的空区为应力积累单元。在实际地壳中,经常受到多种动力作用,如地球自转的角速度突然变化,固体潮的变化,大气压的突然变化,上地幔的突然运动,大地震的发生等。在这些动力源中,大地震是一种最重要,力量最大,对周围应力调整运动影响最大的动力源。一次大地震的强烈振动在水平方向可以伸展到几百公里,在垂直方向也会影响到上地幔甚至更深的地方。因此,本文利用大地震这一动力源在其附近地区造成的应力调整活动所显示的地震活动特征来判别强介质区域和弱介质区域。此外,在大地震发生后的一段时间内,大震区的应力必然要在附近地区进行调整,整个调整过程所显示的地震活动特征也可以作为判别标志。采用动力源来确定空区的另一个优点在于在确定空区期间用的是同一个动力源,介质所显示的动力学特性是在同一力源作用下得到的。因此,所确定的岩石强度相对高的地区就有一定的准确性。如果附近有多次大震发生,则可由多次大震造成的应力调整活动对实际空区的存在和大小进行多次检验。下面举一些地震实例来说明。

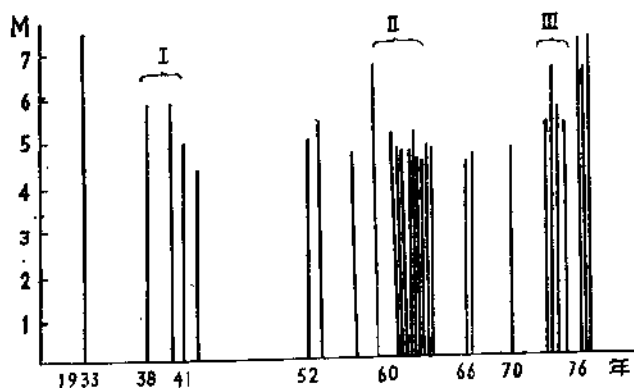


图1. 松潘地震空区序列

(一) 1976年8月16日、8月23日松潘大地震

1. 松潘大地震前空区的确定

1976年8月16日, 22日、23日

在松潘、平武间分别发生7.2, 6.7, 7.2三次强震。在这三次大震发生之前, 在震源区以南, 以西和以北地区均发生过强烈和较强地震, 例如1933年叠溪7.5级地震, 1960年漳腊营 $6\frac{3}{4}$ 级地震以及1973年南坪6.5级地震。这三次地震前后均在松

潘地区引起频繁的地震活动。第一次在1938年—1941年, 第二次在1958年—1961年, 第三次在1973—1974年。活动时段大约为2—3年。其地震序列的时间分布如图1所示。这三次地震

活动高潮在松潘地区形成一个半园形的空区,其过程是:1933年叠溪大震后,地震活动主要在叠溪大震震源区附近,没有显示明显空区;1960年第二次活动高潮时,扩展成明显的半园形空区;1973—1974年,第三次地震活动主要集中在环形空区北端。如图2所示。

2. 松潘大震应力积累单元和应力调整单元的确定

根据组合模式的研究,在发生大地震时间不太长的地区和中强地震活动频繁的地区以及构造交汇地区可以成为应力调整单元,而调整单元之间的空区或空段为应力积累单元。由松潘大震前的空区可以看出,其北端南坪附近的地震活动最为频繁,且位于构造交汇区,因此认为南坪附近是松潘大震北端的应力调整单元。在松潘大震的西南有1933年叠溪大震,这里可作为其南端的应力调整单元。由松潘大震后的余震分布(见图3)可以看到其南端拐向叠溪方向,说明叠溪大震区介质比较破碎,可以作为应力调整单元考虑。如图4所示,积累单元的长度为120公里。按照文献提出的震源断层长度与震级之间的经验公式

$$M = 3.3 + 2.1 \log L \text{ (公里)} \quad (1)$$

求得震级为7.5级,这与松潘、平武实际发生的三次大震能量所折合的震级相差不大。因此,松潘大震前的空区尺度与松潘大震震源体相当,所确定的积累单元与大震时近南北向的P波节面⁽²⁾等震线长轴及余震分布带相一致。

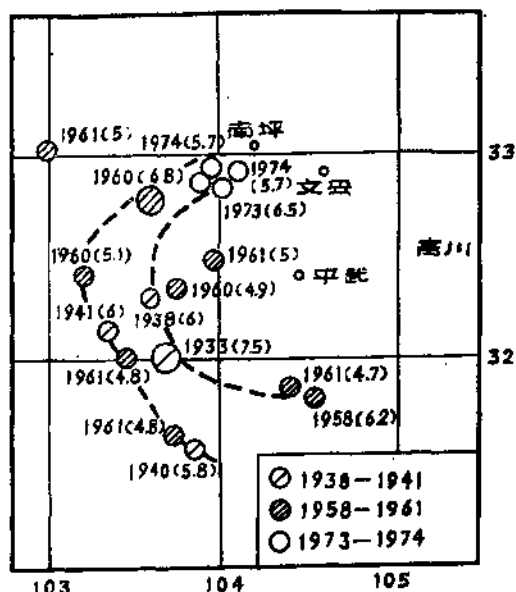


图2. 松潘地震前空区

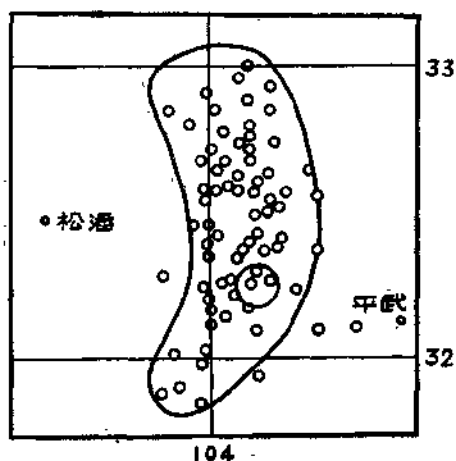


图3. 松潘大震的余震分布

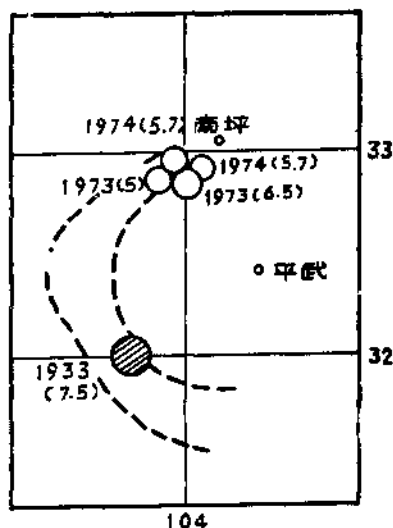


图4. 松潘大震前震源区两端的应力调整单元

(二) 1950年8月15日察隅8.5级大震

1. 察隅大震前地震空区的确定

在察隅大震发生前,在其以南,以北及以西均发生过较强烈地震。如1918年和1931年在察隅之南的印度境内发生过二次7.6级地震。1946年和1947年分别在察隅之西、之南和北面发生过多次7.5—7.9级大震。这几次大震发生后,在察隅地区较大范围内引起了中强地震活动高潮。第一次高潮活动发生在1918—1923年。第二次高潮活动发生在1929—1933年。这二次活动高潮形成了不闭合的长轴为北东走向的围空区。此后,在1938年—1942年又出现第三次小高潮,这次小高潮活动可能是1934年发生在印度、尼泊尔边境的8.3级大震引起的应力调整活动的反映。这次活动主要沿着景洪至腾冲这一地震活动带迁移的。由于这次大震离察隅地区较远,活动强度不高也没有形成明显的空区。第四次活动高潮发生在1946年—1950年,这次地震活动形成的空区位于第一次空区的北部,呈椭圆形。我们认为这二次围空区迭加的部分是岩石强度较高的区域,因而是应力积累区,该区长轴为500公里,短轴250公里,如图5所示。

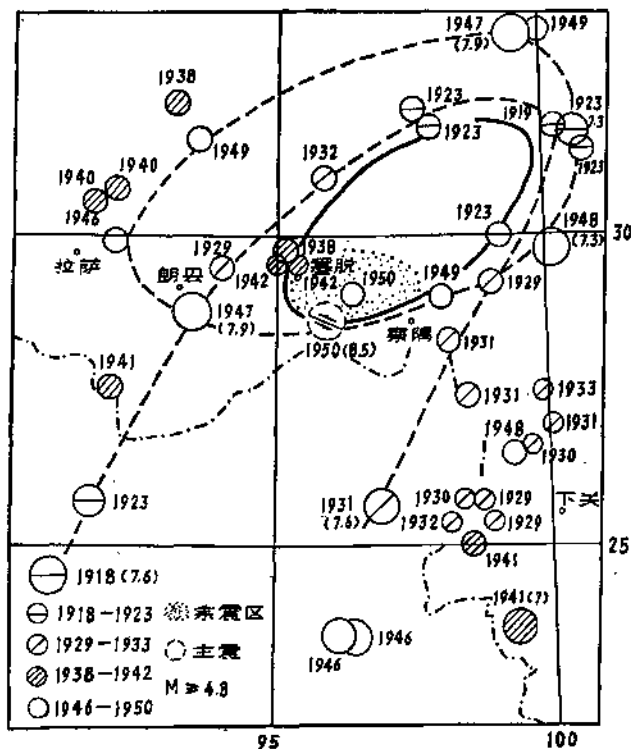


图 5

(1)式求得这次地震的震级为8.4级。根据这次大震的震源机制[3],其P波节线之一为北西西向以及余震分布近东西向来看,前面所判断的应力积累单元是可信的。

(三) 1951年11月18日当雄8.0级大震

1. 当雄大震前空区的形成

这次大震发生前,其南部的印度,尼泊尔边境地区曾于1934年发生过8.3和8.4级大震。这两次大震后在当雄地区引起的中强震活动明显地形成一个椭圆形围空区,其长轴为北东向,此后地震进入平静期。在1950年察隅8.5级地震之后,在当雄地区又形成第二次围空后,该围空区长轴近1000公里。这二次围空区的迭加区域为椭圆形,长轴为北东向。椭圆长轴长340公里,短轴约250公里。当雄地震发生在该区域的边缘,如图6所示。

2. 当雄大震的应力积累单元和应力调整单元的确定

根据围空区边缘的中强地震活动的分布,中强地震密度最大的区域一个在当雄附近,另一个在申扎附近。因此,这两个地区应属于应力调整单元。而它们之间的地段属于应力积累单元。由图6可得,积累单元长度约有220公里,由(1)式可求得震级为8.2级,这与实际震级相符。由于这次大震无震源机制解,因而无法与所确定的积累单元走向作对比,然而当地的地质构造与北西西向的积累单元十分一致,且前面所确定的调整单元位置恰好位于上述北西西向构造端部的多组构造交会区。

(四) 1976年5月29日龙陵大震

1976年5月29日龙陵地区连续发生7.3和7.4级地震。在大震发生之前,在龙陵之西的密支那(缅甸境内)曾于1931年发生过7.6级大震,1941年耿马发生7.0级地震,此后1950年察隅发生8.5级大震以及1970年元月5日在通海发生7.7级大震。这几次大震发生前后均在由景洪至腾冲这一北北西方向上形成一明显的中强以上地震活动条带,并显示了耿马至腾冲这一明显的空段,如图7所示。

由图5可以看到空段的北端为腾冲地区,这里不仅中强地震活动频繁、密集,而且是现代火山区,因此可以认为腾冲地区是应力调整单元。在空段南端是1941年耿马7.0级地震的老震区,由于它发生时间距今还不长,所以也可认为是应力调整单元。这两个应力调整单元的中间空段即为龙陵地震的应力积累单元。该空段的长度约150公里,按(1)式估计震级为7.9级,这一数值比实际震级(两次地震的折合震级为7.6)大一些。

此外,1975年2月4日海城大震前吴开统曾画过一个围空区(4), (见本文图)。组成围空区的中强地震,主要集中在两个时期,第一个时期集中在1966年邢台地震前后,第二个时期集中在1969年渤海地震前后。因此我

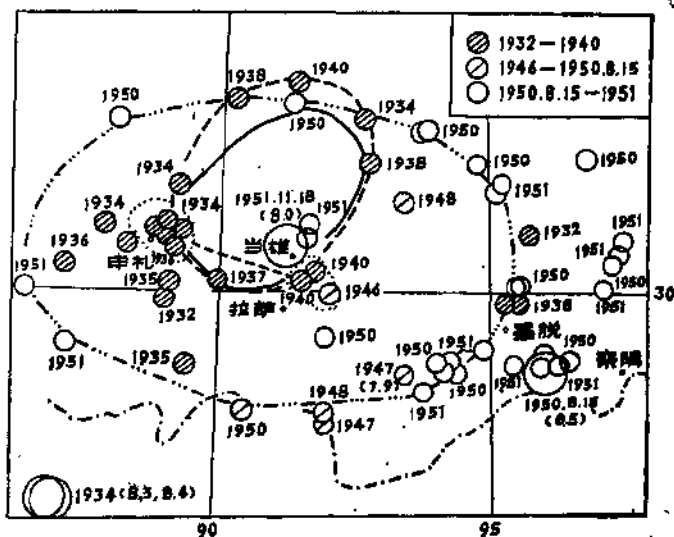


图 6

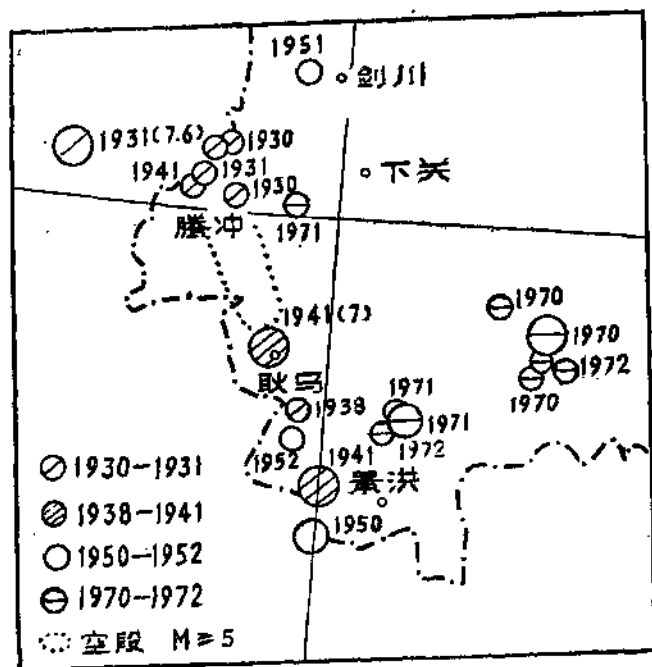


图 7

们认为这两次集中活动是与邢台和渤海这两次大地震对周围地区的动力作用有关的。海城大地震发生在围空区的边缘,其震源尺度小于围空区的空间尺度。

由以上震例可以看到,把一个大地震作为一个动力源来检查周围岩石强度的差异以及应力集中程度(或应力调整程度)的差异,从而确定具体的震源是比较有效的。根据前面的震例,一次大地震发生之后引起的应力调整范围是相当大的。一个8.5级地震所引起的地震活动范围最远可达1000公里。而随着大震震级的减小,其影响的最远距离也明显减小。另外,从以上震例还可以看到,一次大地震发生后其应力调整运动并不是向周围均匀地进行,而是在某些方向上表现得较为突出,特别是在临近发生大震的老区周围,其应力调整运动更为强烈。这说明当一次大震发生后首先将在应力背景值高且又具有调整运动条件的地区发生应力调整和发生地震,因而这些地区附近将是未来的大震区。值得指出的是,在大地震之前1—2年它对周围地区的影响也有增大的情况,表现在地震活动有明显增高,这说明一次大地震发生前震源区对外围也有动力作用。

二、大地震前大空区形成的物理机制

前面我们论述了空区以及应力积累单元和应力调整单元确定的方法,并对中国西南部地区的一些大震进行了初步探讨。我国和国外的一些地震工作者曾广泛地对地震空区进行过研究〔6、7、8〕,并肯定了这一现象的普遍性。因此地震空区成为预报大震危险区的重要中长期指标。然而,关于空区形成的物理机制至今还没有找到很好的解释。有的同志认为,空区的形成是由于空区内岩石强度特别高,但是绝大多数空区在形成前均有破坏性地震发生,这说明空区形成前该地区的地壳介质强度并不是非常高的,介质的强度随时间是变化的。为了解释这个现象,有些同志提出用介质受力变形的弹性—塑性—硬化这几个阶段来解释空区形成的过程,也就是说在空区形成前认为介质处于弹性或塑料阶段,空区形成后,介质处于硬化阶段。根据这个观点虽然解释了空区形成前的地震活动,但是由复杂矿物组成的岩石是否像金属材料那样具有典型的弹性—塑性—硬化过程并不是十分肯定的,因而用它解释空区形成的过程仍然是不合适的。另外本文是用组合模式来解释空区的形成的〔2〕。对于积累单元是老断层重新粘住的情况,在积累单元形成的初期,在构造力作用下沿着断层而会有一些地震活动,但随着构造力作用时间的增长,断层而间的松散粒状物被挤实,或表面各凹凸不平处互相压入和嵌紧。这样整个断层面之间互相紧密齿合,从而使摩擦强度大大增高此时该区域内地震就不容易发生了。震源两端的调整单元由于介质强度低完整性差,易于变形等特点,因此在大震前,在区域应力场作用下,这里往往是中小地震始终活跃的地段,从而形成围绕积累单元的地震围空区。但这种模式仅能解释和积累单元长度相当的空区,在解释大空区(即范围比孕震区大得多,大震一般发生在空区边缘)时,上述观点仍然有困难。此外人们还发现地震空区的空间图案并不是一成不变的,如本文所列举的空区,其空间范围有时相差很大。空区随时间的变化原因是什么,目前还无人讨论。另外,空区的图象一般呈现园形或椭圆形,这单纯用水平力源也难以解释。我们认为,环形图象表明空区及周围的地壳受到某种垂直力作用,由于水平应力场比较稳定,空区空间尺度随时间的变化可能与该区地壳受到的垂直力变化有关。

由上所述本文试图用上地幔的垂直运动来讨论大震前空区形成的机制。如果这种解释能够成立,那么大地水准测量将可以作为一种重要的配合手段来预报地震危险区并进一步研究它们在成因上的联系。

(一) 上地幔的垂直运动对地壳介质强度的影响, 根据震源机制研究, 我国大震的震源断层面是比较垂直的, 其错动方式以平推为主。在这种情况下, 其三个主应力轴的方向为: 最大主应力和最小主应力位于水平面内, 因此上地幔的垂直运动将对中等主应力发生影响。而中等主应力的变化将显著地影响地壳介质的强度。关于中等主应力对岩石强度的影响大约在50年以前芳卡曼 (Vonkarman) 和布克尔 (Boker) 就已指出过。但是具体的影响形式和物理机制并不清楚。1960年格来格斯 (Griggs) 等人〔9〕再次通过实验报导了围压对岩石样品变形和破坏特性的影响。围压不同, 表示中等主应力不同。因此, 围压对岩石强度的影响, 实际上就包含中等主应力对岩石强度的影响。1967—1971年茂木清夫做新了三轴试验〔10, 11〕他认为仅仅考虑 σ_1 和 σ_3 是不够的, 还应考虑 σ_2 , 其实验结果是:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = f\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3 + \alpha\sigma_2}{2}\right) \quad (2)$$

式中 τ 表示岩石破裂错动的剪切强度, $\sigma_1 - \sigma_3$ 表示达到岩石破裂时的应力值, f 为函数符号, 由实验得到 $\alpha = 0.08$ 。另外根据张金铸等人的实验研究〔12〕, 在围压较大的情况下, 中等主应力的增加对岩石强度起增大作用。

由以上所述, 上地幔对地壳底部顶得紧一些或松一些就会影响中等主应力的大小, 从而影响其岩石强度。当某一地区地壳下部上地幔向上隆起运动的力与该区岩层重力相平衡时, 即相当于该地区中等主应力增大, 由前面的实验可知, 该区岩层岩石强度将被提高, 本来在这个地区有一些地震活动, 在这种情况下地震活动就停止了, 而外围地区相应有一些地震活动, 从而形成了地震空区。

以上是断层面比较直立的情况, 当断层面倾斜时, 上地幔向上运动时将在倾斜的断层面上产生两个分力, 一个力平行于断层面, 另一个垂直于断层面。根据库仑摩擦定律, 上地幔向上的垂直运动在断层面的正压力分量将增大断层面的摩擦力, 从而提高了断层面的摩擦强度。我们设想在某一地区在地壳内分布有一定数量的倾斜断层。在没有上地幔隆起运动时, 该区域内有地震活动, 随后上地幔向上的垂直运动作用到该地壳, 它使地壳中的倾斜断层面的摩擦强度得到相应提高, 在此情况下, 地震突然终止活动, 从而形成地震空区。对于上地幔隆起区的外围地区, 由于介质强度小于隆起区内的介质强度, 且隆起区边缘剪切应力较大, 因而会发生地震并形成围空地震。

必须指出上述上地幔隆起运动的幅度是十分小的, 其向上隆起力基本上与岩石下压的重力相平衡。因此我们把它称为上地幔的微隆运动。

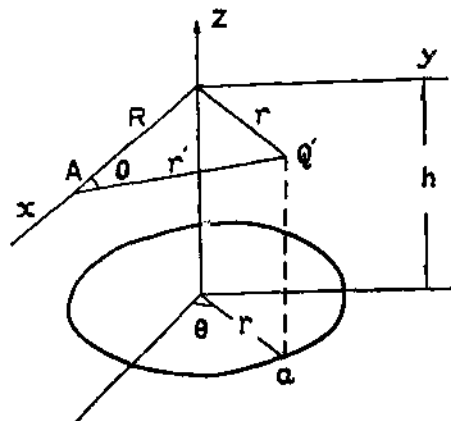


图8 均匀分布于一个圆上的力以及座标系

(二) 上地幔垂直运动在地表引起的应力分布与地震围空区的解释 前一节我们讨论的上地幔运动幅度是比较小的。下面我们讨论上地幔向上运动的作用力超过岩层重力和上地幔作下沉运动这两种情况所造成的地壳表面应力分布以及地震围空区解释。

1. 上地幔向上隆起运动的作用力超过地壳岩层的重力作用 当上地幔的上隆运动幅度较大时, 则上地幔向上的作用力将克服地壳岩层的重力把地壳顶起, 我们把地壳先作为不分层

的均匀介质来考虑, 把上地幔的向上运动考虑为均匀分布在一个平行于地面的圆平面上的均布力。设该圆平面离地面的距离为 h , 半径为 a , 我们选 x, y 平面重合于地面, z 轴向上并穿过作用力的圆平面中心, 如图8所示, 则圆心的坐标为 $(0, 0, -h)$ 。根据以上参数由史奈顿解可以求得表面应力分布〔13〕。其分布力所产生的径向位移分量为:

$$u_r = \frac{F}{2\pi^2 a^2 \mu} \int_0^\pi d\theta \int_0^a \left\{ \frac{\gamma' h}{(\gamma'^2 + h^2)^{3/2}} + \frac{\gamma'}{(\lambda + \mu) [(\gamma^2 + h^2)^{\frac{1}{2}} h + \gamma'^2 + h^2]} \right\} \gamma \cos \varphi d\gamma \quad (3)$$

式中 $\gamma'^2 = R^2 - 2R\gamma \cos \theta + \gamma^2$

$$\gamma' \cos \varphi = R - \gamma \cos \theta$$

设弹性体是不可压缩的($\mu/\lambda = 0$), 那么决定均布力影响的问题即可大为简化。由(3)式可知, $(R, 0, 0)$ 点的径向位移分量是:

$$u_r = \frac{F}{2\pi^2 a^2 \mu} \int_0^\pi d\theta \int_0^a \frac{\gamma' h \cos \varphi}{(\gamma'^2 + h^2)^{3/2}} \gamma d\gamma \quad (4)$$

仿此也可以找到表面的法线位移分量

$$u_z = \frac{F}{2\pi^2 a^2 \mu} \int_0^\pi d\theta \int_0^a \frac{\gamma'^2 + 2h^2}{(\gamma'^2 + h^2)^{3/2}} \gamma d\gamma \quad (5)$$

这些积分计算是初等的, 因此可得到

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{Fh}{2\pi^2 a^2 \mu} \left[\frac{(a + \gamma)^2 + h^2}{\gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\times \left(\frac{\gamma^2 + a^2 + h^2}{(\gamma + a)^2 + h^2} \times F(k, \frac{\pi}{2}) - E(k, \frac{\pi}{2}) \right) \\ u_z &= \frac{F}{2\pi^2 a^2 \mu} \left[\frac{(a + \gamma)^2 + h^2}{\gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\times \left(\frac{a^2 - \gamma^2 - h^2}{(\gamma + a)^2 + h^2} \times F(k, \frac{\pi}{2}) + E(k, \frac{\pi}{2}) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{其中 } F(k, \frac{\pi}{2}) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$E(k, \frac{\pi}{2}) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

$$k^2 = 4a\gamma / [(\gamma + a)^2 + h^2]$$

表面应力为

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{Fh}{\pi^2 \gamma^2 a^2 [(\gamma + a)^2 + h^2]^{\frac{1}{2}}} \left((\gamma^2 - a^2 - h^2) F(k, \frac{\pi}{2}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\gamma^4 - (a^2 + h^2)^2}{(\gamma - a)^2 + h^2} E(k, \frac{\pi}{2}) \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{Fh}{\pi^2 \gamma^2 a^2 [(\gamma + a)^2 + h^2]^{\frac{1}{2}}} \left((2\gamma^2 + a^2 + h^2) F(k, \frac{\pi}{2}) \right. \end{aligned} \quad (7)$$

$$- \frac{(\gamma^2 + a^2 + h^2)^2 + \gamma^2 (\gamma^2 - 5a^2 + h^2)}{(\gamma - a)^2 + h^2} E(k, \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

利用上列方程我们可以算出应力分量 σ_r 的 σ_θ 这些分量随 γ 与 h 的变化如图9所示。其中假设 a 不变,为某一常数。由此图可以看出地表应力变化最大部位位于 $a-1.5a$ 范围内,亦即位于垂直力作用的边缘及其外围地带,也就是上地幔垂直运动的外围地带。这里恰好是震前中强地震活动的场所。这一计算结果表明在垂直力向上作用的部位应力变化是很小的。因而这里应是不易发生地震的地方,而在垂直力作用的边缘地带应力变化却比较大,从而导致在垂直力作用的边缘地带频繁发生地震并形成地震围空区。特别是当上地幔向上隆起的面积远远大于上地幔垂直力作用面的深度时,则由前面的公式和图9可以看出,其在地壳顶部产生的张应力在垂直力作用的边缘地带为最强,而中部张应力并不大。这样由于垂直力边缘拉应力大,再加上原来有强大的水平向剪切应力存在这里的应力值将高于上地幔垂直力作用的内部地区,这样就会形成很大的地震围空区。这种大空区是在同样的介质条件下在一定的外力条件下产生的,因此不同的外力同样的介质条件下可能产生不同的空区。而不同时期可能力源是有区别的,因此空区图像是变化的,其中不同时期地震围空的重叠部分才可能是真正的岩石强度高的区域。

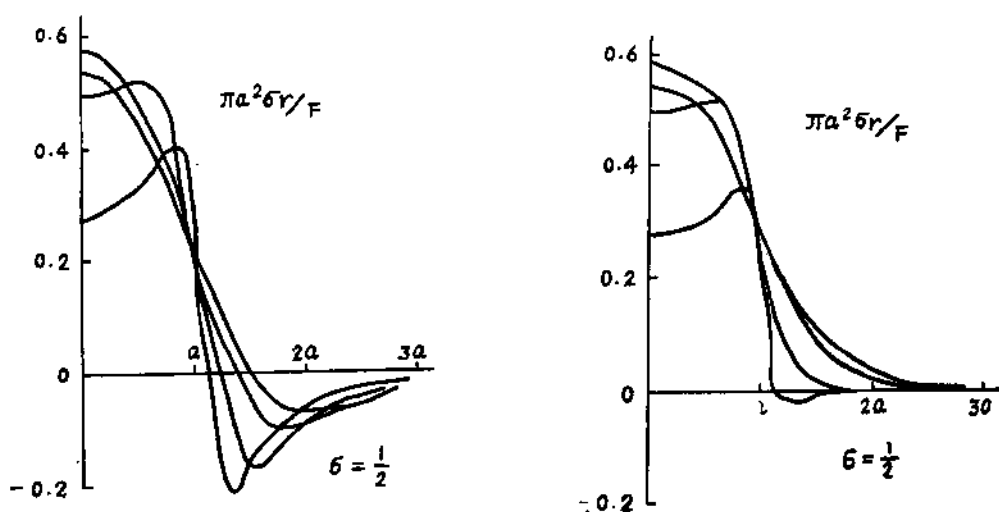


图 9

2. 上地幔作垂直下沉运动,并假设地壳介质为连续的情况。这相当于在地壳底部作用一圆形的均匀荷载一样。它引起地壳表面的应力分布和位移分布与前而的计算结果相类似,仅是此时的表面应力为压应力。其较大应力变化也同样围绕着地壳作下沉运动的边缘地带,并形成与地壳作向上隆起运动时相类似的地震围空区。在实际中围空区的形状取决于垂直力作用的面积和形状。

在实际的分层地壳中,由于存在着一些软弱夹层,当地壳受到强大的水平力和垂直力的共同作用时,在地壳作下沉运动的上部,隆起运动的边缘地带以及垂直差异运动的过渡地带

将会在地壳中软弱夹层附近产生层间解缚现象〔15, 16〕。层间解缚现象发生后, 解缚区上部的岩层在自重作用下产生弯曲变形, 这实际上也是一种垂直力作用, 它所产生的应力将加剧垂直力作用的边缘地区的应力。对于大空区来说, 大地震往往发生在空区的边缘可能与这一原因有关。

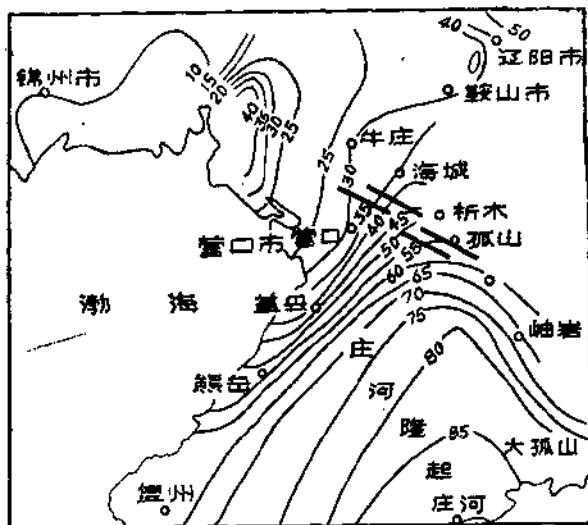


图10 辽南地区垂直形变图和1975年2月4日海城大地震错动情况

(三) 大震前地震围空区与地壳垂直运动相关性实例在我国有大量的地震空区震例, 然而在空区附近有形变重复测量的却很少。1975年2月4日海城7.3级大震是既有空区资料〔12〕又有大地水准测量资料的一次地震〔14〕。而且围空区的形成时间和大地水准复测间隔基本上是同步的。根据文献〔14〕的介绍, 海城大震前曾在1958年和1970年围绕辽东半岛间进行过两次大地水准测量。1970年的复测资料表明围绕着庄河有一较大幅度的隆起区。隆起区范围大致有100公里左右, 如图10所示。根据吴开统等同志的总结〔4〕, 海城大震前的

地震围空区如图11所示。虽然空区的东部大地水准资料不完整, 但空区西部大地测量资料却比较完整。另外组成围空区的那些地震大多发生在1964年以后, 这与大地水准测量的时间也大体同步, 因此这两种资料的对比和分析将具有一定的意义。

根据图10和图11的对比我们可以看出海城大震前地震围空区大致与庄河隆起梯度较大的地区相一致, 组成围空区的地震围绕着显著隆起区的边缘发生。

上述的讨论表明, 与震源体尺度相近的地震空区可以用组合模式得到解释。如果在上述空区的地壳底部再有上地幔垂直运动作用在更大的面积上时, 则上述与组合模式相应的小空区图案就会发生畸变, 即空区变得很大。因此上地幔垂直运动随时间的具体变化可能是导致了空区随时间变化的原因之一, 也是大空区形成的可能机制。

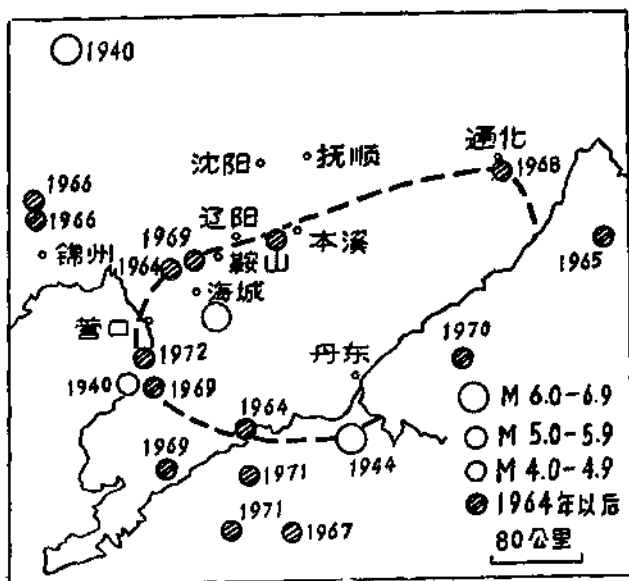


图11 1940年—1974年 $M \leq 5$ 1958—1974年 $M \leq 4$ 辽南地区的地震分布

(二)

由震源机制资料论证我国

地壳内现代垂直运动的独立性和普遍程度

本世纪六十年代以前,我国地震工作者及当时在我国工作的苏联地震学者一直认为我国的大震主要是由现代的垂直差异运动形成的。也就是说我国地震是现代的垂直向剪切力引起的。1963年郭增建和姜秀娥同志首次研究了我国本世纪以来48个地震(震级由5.5~8.5级)的震源机制资料并经过统计分析后指出,我国大震的震源断层面比较陡直,平推错动分量大于倾滑分量,由此推断我国的现代构造运动是偏近于水平方向的。1966年后我国境内频繁发生大震,其震源机制情况进一步证实了1963年郭增建等的推断。本世纪六十年代后期,板块学说兴起,它进一步强化了水平运动的观点。但是有些学者又过分强调水平运动,单纯用水平运动来解释我国大震的发生以及其它地质现象,而忽视了上地幔对我国地壳施加的垂直力作用。1977和1979年郭增建等又根据大地测量资料中的垂直运动和震源机制资料中正断层成份的存在论证了我国地壳内除了受到强大的水平力作用外,上地幔对地壳施加的垂直力作用是不可忽视的。本文统计了全国更多的震源机制资料来论证我国垂直运动的独立存在性并研究其普遍程度。

一、我国水平应力场的性质

前面已经说过,我国的大震其震源断层面比较直立,且错动方式以平推为主。但是平推错动的力源还是有争议的,即同样的平推错动既可以由压应力形成,也可以由张应力形成。

对此我们可用下面的原则来鉴定:

1. 从能量角度或摩擦力角度鉴定应力。

如所周知,地震的大小取决于孕震断层面的大小,错动幅度以及静摩擦极限或岩石强度(它们相应于初始应力的)。在前面两个参数相同的情况下,要使地震能量大,则必须断层面上的摩擦强度高。根据摩擦定律可知,在压应力作用下断层面上的摩擦强度比较高,因此断层面上积累能量比较高,地震就比较大。而在张应力作用下断层面上的摩擦强度比较低,因此错动时地震能量比较小。另外根据模拟实验,在高温高压下,压力作用下的岩石强度比在张力作用下高。如图12所示。图12表示的是花岗岩石在围压为5千巴时不同温度下压缩和拉伸试验得到的应力—应变曲线。从图1中下面两条曲线的对比可以看出压缩试验得到的花岗岩石强度比拉伸试验得到的强度要几乎高出一倍。还应指出,在实际地球中,伊萨克

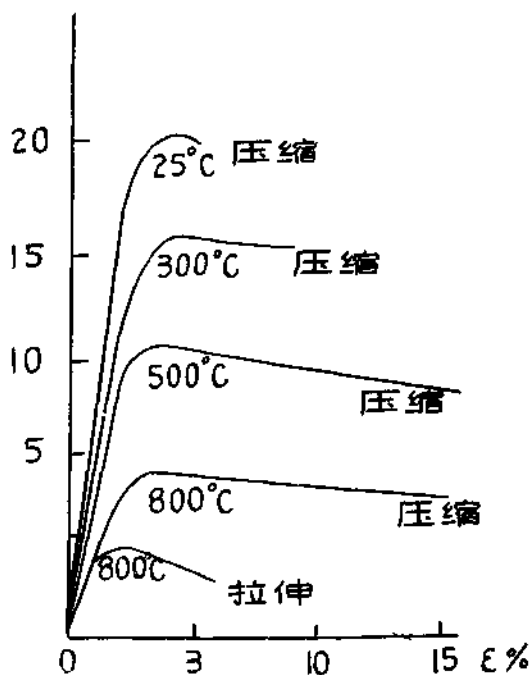


图12 花岗石的应力应变曲线围压5千巴,
压缩时 $\sigma_3 = 5$ 千巴

斯和奥里维曾根据70年李希特提供的地震目录进行过统计，他们发现大多数大地震发生在板块相互挤压的俯冲带，即岛弧区，这里最大震级为8.9，而在太平洋，印度洋，北冰洋的洋脊顶部（张力区）最大的震级仅为7级，东太平洋隆起顶部的大部分仅少数几次地震大于5级。

根据以上的能量观点，我们认为，我国平推错动的地震虽然由震源机制资料不能确定其区域力是受压还是受拉，但是从它的能量很大这一点我们选择受压是合理的。比如1668年山东郯城8.5级大震，1556年华县8.0级大震，1906年玛纳斯8级大震，1931年富蕴8级大震，1920年海原8.5级大震，1927年古浪8.0级大震，1973年炉霍7.9级大震，1976年唐山7.8级大震等，这些地震的能量是很大的，因此我们认为这些大地震是在压力作用下所形成的剪切错动。至于那些位于8级以上大震的中间广大地区内的能量比较小的地震，从能量观点来说，它们可以是受压引起，也可以受张引起。但是由大震补插内推也应当认为其平推错动是在同样的水平压力作用下形成的，不然就会与大震的力源相矛盾。因此我们认为，我国的大地震主要是受水平挤压力作用形成的。

以上是纯从震源机制和能量角度讨论的。这与板块学说认为中国地壳承受着太平洋板块和印度板块的水平挤压的观点是一致的。

二、垂直运动的独立存在性

1. 地壳垂直运动的独立性 根据震源机制资料的统计，我国许多大震是平推正断层错动。根据一般的观点，当水平挤压力以一定角度作用到地壳内具有一定的倾角的断层面上时，可产生平推兼逆断层错动，而不能产生平推兼正断层错动，如图13所示。如果用水平的构造张应力来解释正断层的形成，则与前述的能量准则和板块学说相抵触。在这种情况下，如何解决这种矛盾呢？我们认为只要在强大水平力作用的震源上再迭加上地壳的垂直向差异运动则问题就可以得到解决，如图14所示。因此要解释我国大震平推兼正断层错动只有承认震源地方既作用有强大的水平压应力，同时又有垂直力作用才行。水平压应力来自于远处板块的挤压；垂直力来自于上地幔的相变，重力分异和势扩张等。因此我们认为大震机制中如有正断层分量存在，即证明地壳中有独立的垂直力存在。另外由于我国地壳承受着巨大的水平压力作用，在这样的构造力作用下，凡是带有倾斜的断层面上会产生由这一水平构造压力派生的逆冲分量。因此对于平推兼正断层错动的地震来说，震源处的垂直差异运动，不仅要抵消上述水平力造成震源断层上盘向上运动的力量，而且还要拉着上盘向下运动，才能形成正断层，因此推断作用在震源地方的垂直力是不小的。据我们初步的估算，这个力大致为水平压应力的1/3。必须指出在我国各地还分布有许多平推兼逆断层的地震，对于这种类型的地震，我们就只好拿它来独立地论证地壳内的垂直运动，因为地壳的垂直差异运动和板块的水平挤压运动都可形成平推兼逆断层错动。



图 13

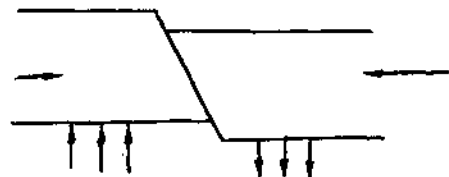


图 14

2. 地壳垂直运动的普遍程度 根据我们对全国震源机制资料的统计分析，在我国大陆

地区有不少地震是属于平推兼正断层或正断层性质的。其中我国及邻近地区的6级和6级以上地震震源机制资料列于表1；我国大陆内部5—5.9级地震列于表2。

我们把表1,表2中走滑兼正断层或纯正断层的地震绘于图15、16。由图可以清楚地看到这种性质的地震分布在我国不同地方。特别是在块体的边界上,如青藏高原块体边缘,华南块体边缘,以及大华北块体边缘。由此可以推论,我国的大陆地壳块体除了受印度板块和太平洋板块的强烈挤压外,各块体在上地幔垂直运动的驱动下存在垂直运动,其中块体边缘垂直运动最大。我国大陆的走滑兼正断层性质的地震特别是大地震,对我国地壳块体存在着独立的垂直运动提供了证据,从而提醒人们在研究地震问题时不可忽视地壳的垂直运动对地震孕育和发生所起的作用。

三、上地幔现代垂直运动的证据

在前面一节中,我们用平推兼正断层的震源机制论证了我国大陆地壳中大震的孕震力源不仅有强大的水平力源,而且还存在着独立的垂直力源(指不是由水平力派生的)。这后一个力源可能来自于上地幔的运动。然而上地幔的运动的直接证据目前观测得比较少。近几年来我国有一些地震工作者用地震法、重力法或大地电磁测深法测定莫氏面的起伏,并用这种起伏来说明上地幔的运动情况。但这里存在一个时间尺度问题,因为实际上目前测得的莫氏界面起伏可能是地质年代形成的,不能阐明现代的运动。

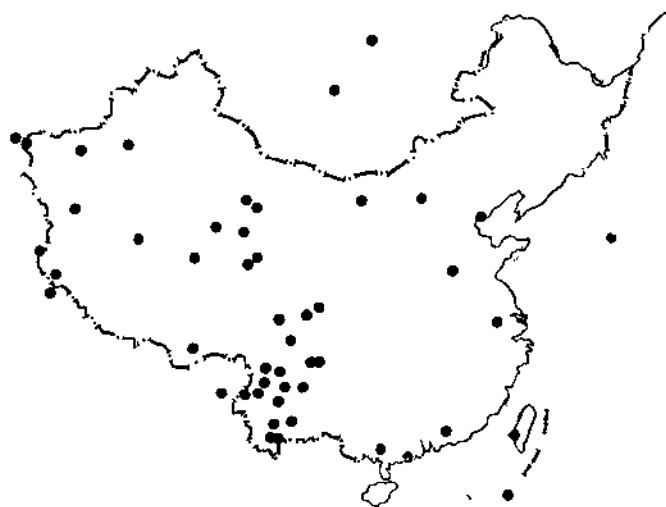


图15 我国大陆及邻近地区 $M \geq 6$ 级走滑兼正断层地震分布图

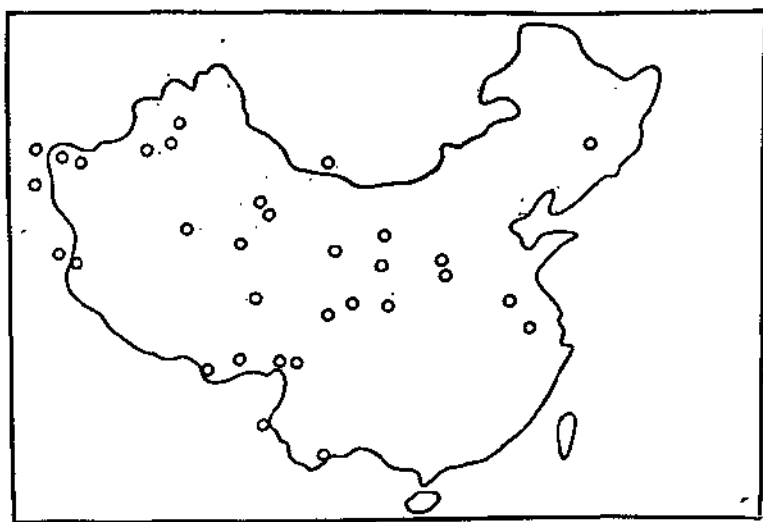


图16 我国大陆及邻近地区 $5 < M < 6$ 级走滑兼正断层地震分布图