

区域应力场的地表效应—— 重复大地测量结果的解释

朱 运 海

(国家地震局第二地震测量队)

现今的地壳运动,主要是构造应力作用的结果。因此,应用重复大地测量研究构造应力场正在被人们广泛地使用。本文根据我国部分地区的大地测量资料,讨论区域应力场的地表效应,并从研究区域应力场的强度变化入手,讨论形变测量方法在地震预测中应用的可能性。

大区域基本应力场与长趋势地形变

就地壳垂直形变而言,长趋势形变是以继承性运动为主的。它的主要表现形式是:继承了新生代以来的相对升降运动,并以带状相对隆起和凹陷为主,形变带的方向与主要活动构造带基本平行。在不同构造块体交界地区,则反映了不同方向的相对张压运动,出现垂直形变带方向的交接区。因而大范围的地壳垂直形变,可以解释为以水平应力为主导的大区域应力场的作用结果。带状的相对隆起和凹陷,类似于“褶皱”的形成过程。

以我国华北和陕、甘、宁交界地区为例,前者(图1)主要显示为北北东向的相对隆起和凹陷,形变带方向主要接受本区北北东向活动构造带的控制^[1],出现了郯庐沉降带、太行隆起带和汾河沉降带等继承性相对运动。它反映了近东西向水平应力场的主导作用;后者(图2)则主要显示为较大范围的形变带方向的交接区,反映了本区受着华北、青藏高原、阿拉善和华南诸块体相对运动的控制。在一些主要的局部地区,新生代以来的继承性运动较为显著^[6]。如渭河盆地、徽成盆地的相对下降;鄂尔多斯的相对上升,西秦岭近东西向的相对隆起以及西礼盆地东侧的局部相对下陷等等。本区的西侧,则主要显示了沿祁连山褶皱带方向的相对隆起和凹陷,不存在块体交界区的复杂形变带。

以上所述之垂直形变的基本形态,是由长周期的重复大地测量结果获得的,它们是长趋势的和大规模的。因而它们反映的是大区域基本应力场的效应。在此,我们否定可能存在着局部的或者某一短时间内的局部隆起现象,而它可能与局部的垂直向应力相关^[10]。但是,在长趋势、大规模的相对运动中,它将是次要的。

关于长趋势水平形变,目前获得的资料不多。从我国一些震区或非震区的重复测量结果看,有以下两点迹象是比较清楚的。其一是地表水平形变主要反映为不同构造块体的相对运动,更严格地受着构造边界条件的约束;其二是在地表破裂前后,水平形变显示是有显著不同的。对此,我们先从唐山震区的资料谈起。

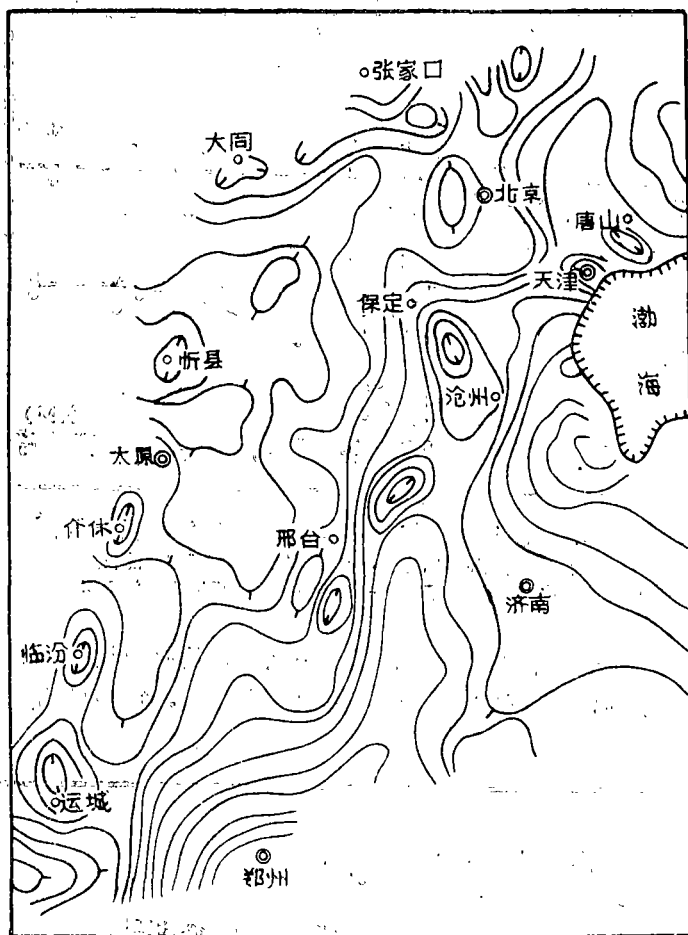


图1 华北垂直形变图(1951—1973)

唐山地震的各种资料都说明,破裂是以水平剪切运动为主的。重复大地测量的结果,完全证实了水平运动的主导作用,破裂面两侧的位移形态符合弹性回跳理论的第三阶段形态

(图3b)〔8〕。但是,从图3a可以看出,震前较长周期的测量结果,却没有发觉显著的剪切应变(至少说没有 10^{-6} 以上的剪切应变)积累的迹象〔注〕。这种破裂前后的差异,说明构造边界条件对形变的控制作用。在震前,由于地表没有破裂,不同方向的构造边界面对地表的相对位移起着相互约束的作用,从而在构造交会地区的地表形变测量,将难于显示统一方向的剪切位移场。但是,对于客观存在的水平应力作用,测量的结果将以另一种形式显示出来,这就是区域性的压、张效应,即区

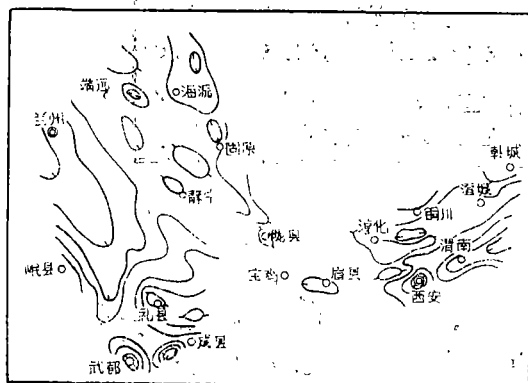


图 2

形变的主要效应形式,尤其在构造交会地区是如此。这种现象在我国西北地区是普遍存在的。布设在构造交会地区的独立三角网,一般都没有显示统一的剪切位移场(至少说没有显示 10^{-6} 以上的统一剪切位移)。然而在不同的阶段内,却可以发觉基本一致的面积收缩或扩展。在陕、甘、宁交界地区,往往是以收缩为主的。在那些跨单一构造的短边网上,既可以显示普遍的收缩和扩展,而且在一定区域内,或者在某一主要构造带上,具有基本一致的压、张主方向。断层的局部蠕动(或可能存在的剪切应变)信息,也只能在跨单一构造的测量中发觉,其量级亦可达 10^{-6} 。

总之,在大区域基本应力场作用下的地表水平形变,首先显示的是不同构造块体的相对运动,而出现区域性的面积收缩或扩展;由于构造边界的相互制约作用,将造成地表剪切位移在破裂前是不显著的。只有在跨单一构造的测量中,方可获得一定量级的剪切位移信息。水平相对变化量的大小,一般随测边长度的增大而减少,也说明形变主要发生在构造带附近,以块体相对运动为主。

根据以上的讨论,说明地壳形变首先是以水平应力为主的大区域基本应力场作用的结果,构造边界条件对形变的效应起着重要的控制作用。因此,研究地壳形变首先必须立足于大区域基本形变场的研究,并且以构造块体或主要构造带两侧的相对运动的研究为主。在地震预测中,基本形变场的研究,将可以提供长趋势弹性应变积累的构造运动背景,作为布署中、短期监视的依据之一。据我国几个大震的经验,这种背景指标主要是区域性的形变带交接区,尤其是垂直形变梯度较大的交接区。但必须明确,这不是未来必震的指标。一方面,它仅仅是可能导致应变积累的必要条件。从一些地区的多次测量结果看,它是以弹性连续形变为主的,具有可逆性;另一方面,而且是更重要的方面,破裂的充分条件决定于区域的介质条件和震源区的硬化过程。从地震预测的实际需要出发,必须在研究大区域基本形变场的基础上,重点研究区域应力强度变化的效应,以及震源区附近的中、短期形变过程。

区域应力强度变化与中期形变背景

大区域基本应力场在相当时期内是基本不变的,它的地表形变效应主要显示在构造边界附近。因此,应力活动的强度变化,也必然在这些地区的中期形变中得到反应。大地震发生在区域应力活动加强过程中,于是利用一些特殊地区的中期形变资料研究区域应力的强度变化,将是形变测量在中期地震预测中的主要任务。可以预计,随着形变测量工作的深入,在中期地震形势的估计中,它可能将比其他一些方法获得更早和更可靠的信息。从现有资料看,在海城、唐山地震前,华北应力活动的加强在大区域中期形变中是有反应的。自1973年前后开始至1976年末,是华北区域应力活动的一次加强过程。在整个华北及其西缘的陕、甘、宁交界地区,一些特殊部位的大地测量结果出现了同步的中期异常。

华北一批地形变台、点均先后在1973年—1974年出现转折或变速(图5)。而且唐山震区的再次隆起以及华北其他前兆手段的趋势性中期异常,也基本开始于1973年前后。尽管这些趋势的发展是不一样的,但它们始于同步的时间以及分布范围之广,说明是大区域应力场活动的共同效应。反之,它们尔后的不同发展,则证实了它们不能由一个震源场的变化过程所解释。

同时,在陕、甘、宁交界地区,地壳的水平、垂直形变也普遍从1973年开始出现活动的新迹象。它们的共同特点是,反映出华北块体向西挤压的加强。图6是1972年至1976年陕、

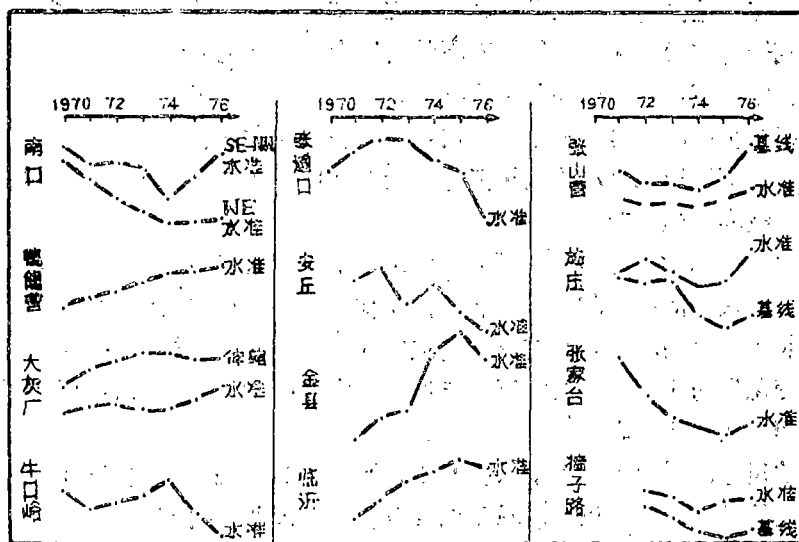


图5 华北形变台站、点年平均图

甘、宁交界地区大地测量的结果。在华北块体西缘地带，地壳水平形变普遍显示为区域性的水平面积收缩。由一些跨单一构造短边网解析的局部主压方向，说明华北块体向西挤压的主导作用(就诸块体相对运动而言)。而且，在一些收缩区出现垂直向的隆起或褶皱〔7〕〔8〕〔9〕。1976年以后，局部主压方向已普遍向南北偏转，可认为东西向压力相对有所松弛。

在此，我们强调了形变效应的大范围和时间同步性，以说明显示的主要是大区域应力加强的信息，而区域应力加强即意味着可能导致大震活跃。因此，可以通过大地测量的合理布局 and 复测，尤其是加强对块体交接地带的布测，作为中期地震形势估计的主要依据之一。另一方面，由于它们主要是大区域场的效应，从而将出现一批(而不是一个)局部形变异常区。

它们的大多数仍属弹性形变或塑性硬化的初期。最终是否导致破裂，既与它的长趋势基本形变背景有关，而且主要将取决于局部异常的进一步发展过程。根据唐山经验，这个过程包括震源区的硬化过程及其对外围区的影响。而外围区的反应可能仍以大区域场效应为

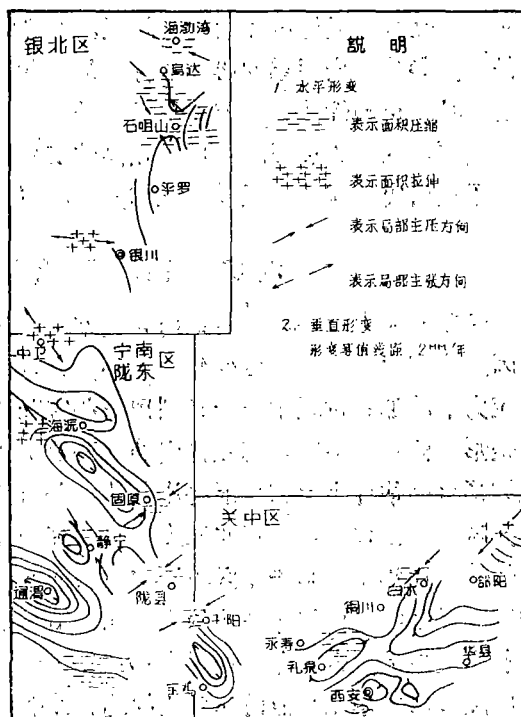


图6

主。

唐山震前记录到一批一年左右的形变异常信息, 可视为是而后唐山地震的必震信息。其中, 外围主要显示为不稳定弹性加速过程, 即有趋势性的反复形变(如图7); 而震源区却表现为相对的稳定。它们的空间分布基本上是“围空”式的〔2〕。同时, 外围的反复变化有近台和远台之别, 说明它们受震源硬化过程的影响程度是不同的, 而它们反复次数及反复时间均没有显著的同步性, 从而从总体上看, 它们可能仍以大区域场的效应为主。一般地说, 我们可以通过具有一定密度的台阵, 根据不稳定弹性加速形变以及形变的相对稳定的空间分布, 判断未来发震的危险区。而对发震的时间指标, 从外围异常中是难以明确的。从区域应力场效应为主的观点出发, 客观上就否定了单台或远台预报地震的可能。

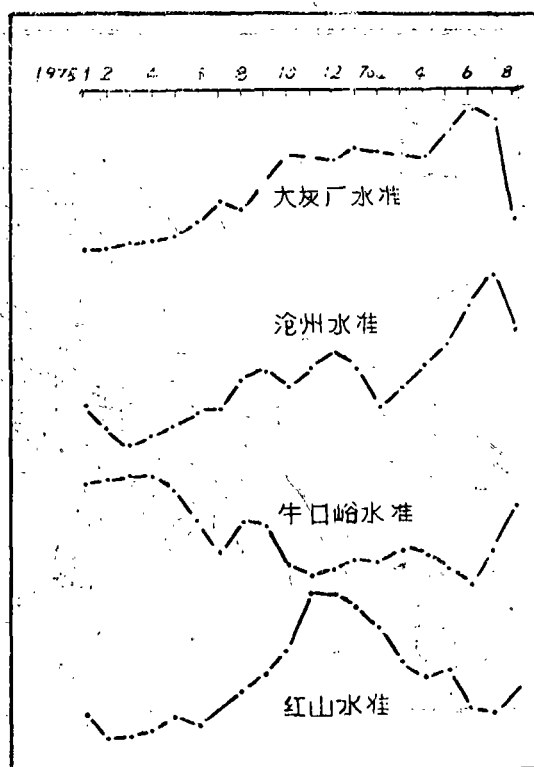


图7 唐山震前形变中、短异常图

至于地震前震源区的短临信息, 无疑地属震源区本身的变化过程。这种过程在地表形变方面的反应, 可能在空间、时间、量级方面都是很局限的。即只在某些特殊的构造部位上, 在某些瞬时中出现微量的突变。那么一般地说, 目前采用以大地测量方法为主的形变台站, 它的实测精度和布设密度都无法满足发现短临信息的需要。因此在目前条件下, 形变测量的主要任务应该着重研究大区域场的效应, 以求在对二、三年的区域性地震形势估计和中短期地震预报中起积极的作用。

关于震时形变及外区后效

一个震源区的形成, 是经过长期应变积累的结果。就地壳形变而言, 如果没有长期的弹性形变过程, 也就无所谓应变能的积累。对那些长期以来形变量很小的地区, 总可以视为不可能发生强震的稳定背景。震时的形变, 则只是经过长期应变积累后的一种突变, 是长期基本应力活动的连续反应。因而, 它的形态往往总是以继承性运动为主的, 或许在某一主震中反映, 或许在一系列地震过程中完成。对此, 有关的一些震例总结中均已详述。本文拟进而强调如下两个基本方面。

震时破裂面两侧的相对运动, 是控制一切形变的主体, 而且它们的范围(指短轴方向)往往是不大的。外区的后效, 随着具体构造条件的不同而异, 但主要仍是区域场的反应, 震区及其附近的破裂形变, 往往是以水平剪切为主。垂直形变除了破裂面两侧的相对升降运动外, 将受着水平形变的影响, 出现局部的隆起和凹陷。图8、9是我国大地测量资料比较

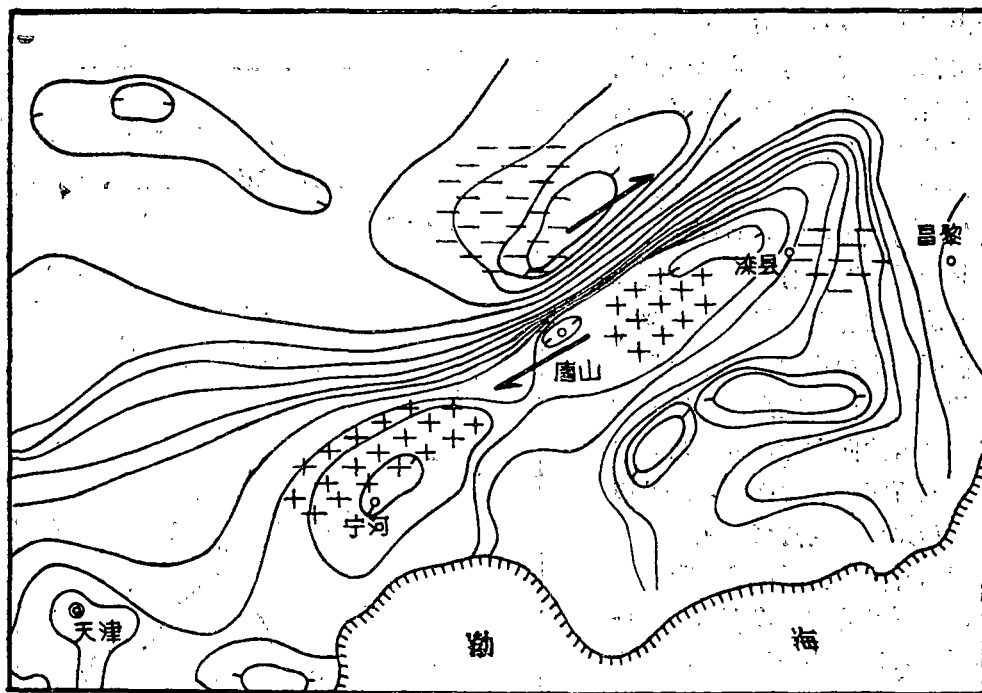


图8 唐山地震形变图

丰富的两次震例〔5〕。它们的共同点是：水平剪切控制着整个震区的形变，除了相对错动外，在错动面的端侧，随着横向约束构造的不同，出现平面面积收缩和扩展；垂直形变除了破裂面两侧相对升降外，在收缩和扩展区产生局部相对隆起和凹陷。在此，我们将否定一种“震中区下沉”的解释。所谓“震中区下沉”，主要是地表破裂后重力作用的结果，在资料中显示于土中标石下沉，而基岩标志恰恰是不明显的（通海震中区水准结果正是如此）。此外，地下水的流失也必将导致地表沉陷。所以它是环境变化的反应，而并非构造运动的实质。于是，就可以把震时形变解释为，在区域应力的连续作用下，经过长期应变积累后发生的剪切相对运动。而且水平运动为主，垂直运动为次。

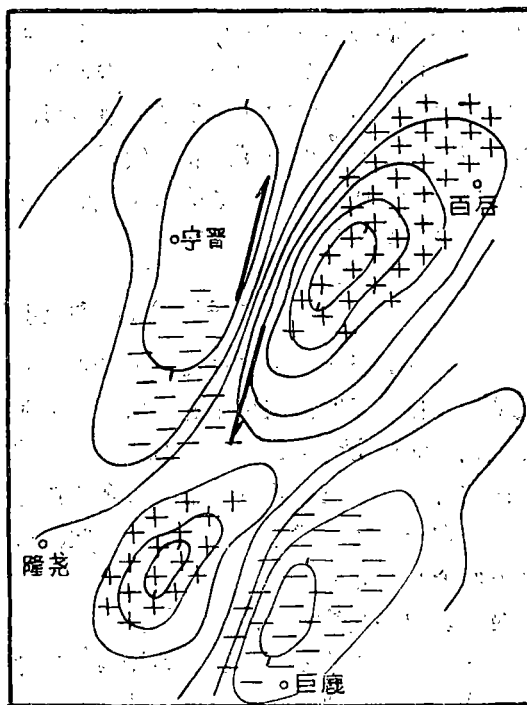


图9 邢台地震形变图

至于外区后效, 我们建立在其构造条件没有任何改变、地表不参与破裂的基础上认识。震源区破裂后, 其邻区将相应出现应力松弛, 导致在地表形变中可能包含有一些断层的蠕动或局部弹性恢复。它们出现的时间可能比较短促, 但其范围应是局部的。而且是与震区有构造相关的局部地区; 而在远区, 在基本应力场的连续作用下, 随着应力调整的过程, 将逐渐出现形变效应, 其范围可能较大, 但时间将具有一定的滞后性。松平地震以后, 甘肃南部地区的形变效应基本上属于这种过程。图10是同一水准路线不同构造位置上的不同反应; 图11是外区的滞后效应。而在甘肃南部的大范围形变测量, 却基本上没有显著的效应, 仍都保持原长趋势形变的特征〔9〕。

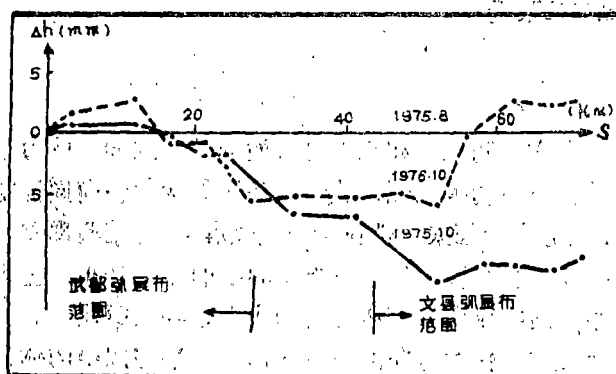


图10 武都—临江垂直形变图

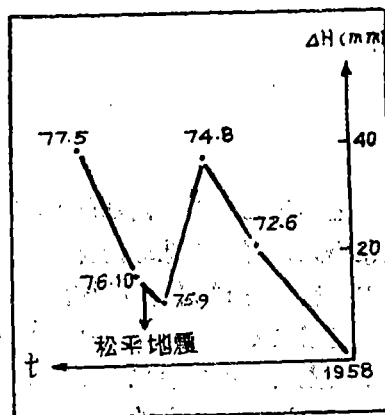


图11 武都弧两侧相对高程变化图

外区后效是个复杂的问题。由于大地测量纯属地表作业, 必然建立在外区地表不参与破裂的基础上认识它们。一般地说, 我们倾向于从基本应力场的角度认识, 而不轻易地把局部形变过程作为某一远震的解释。此外, 对于邻区的大面积形变 (尤其是大面积垂直形变), 需要考虑环境条件的改变出现的暂时变化, 随着环境条件的重新平衡过程, 这些变化将逐渐趋于恢复。这种变化, 应该属于暂时的干扰。

后 语

对于重复大地测量结果的认识, 随着学术观点的不同, 往往出现一些不同的, 甚至相反的解释。本文从大区域应力活动的角度出发, 做了以上阐述。并强调了构造边界条件对地表形变的控制和约束。供讨论者参考。

主 要 参 考 资 料

- 〔1〕中国地壳垂直形变图及说明书 (1973.12)
- 〔2〕唐山震前后形变(台)的趋势变化及78年中期趋势意见
- 〔3〕唐山大震的地壳形变模式
- 〔4〕唐山7.8级地震的地壳形变
- 〔5〕地震与地壳形变(1)、(2)

(下转第82页)

参 考 文 献

1. 曾融生等《我国境内瑞利波的相速度》 地球物理学报 1963, Vol.12, № 2
2. 张诚等《甘肃及邻近地区的地壳厚度》 西北地震学报 1979, Vol.1, № 2
3. 滕吉文等《柴达木东盆地的深层地震反射波和地壳构造》 地球物理学报 1974, Vol.17, № 2
4. 曾融生《莫霍界面的重力补偿和地壳结构的基本模式》 地球物理学报 1973 Vol.16

(上接第28页)

JSZ-2型自动测氦仪具有下述一些特点:直观性好(水氢脱气过程全可看见,若出现不正常现象可及时发现排除);灵敏度高(氦射气进入闪烁室在动态平衡下,若水中氦浓度变化,数分钟内计数值即有反应);准确可靠(消除了人工单点取样观测引入的各种主客观误差,外界条件干扰因素相对减小。脱气稳定,能反应水氢连续变化,观测数据资料质量保证);操作简便(仪器掌握容易,安装调节方便,脱气装置用水量小,经校正好后,无需再行调节,不要人员日夜值班);抗腐蚀(玻璃比金属化学性能稳定);易清洗(喷水口,脱气咀不易堵塞,若有沉积物垢,用稀盐酸即可除去);成本低(全套玻璃脱气装置用费500元)。另外还可进行有线传输。若将玻璃脱气装置配FD-125型仪亦可进行半自动化连续观测,利于普及推广。基本上能满足当前水氢观测和预报地震的要求。但也有一定局限,如玻璃脱气装置怕震易碎,全套仪器体积大搬运不便。现场观测要求工作条件较多(需在井泉点修建观测室,要~220交流供电,要有2米以上水头等)。用于热水观测少。所有这些都需今后革新完善,将自动连续测氦仪向小型轻便;交直流两用,有线传输,无人遥控研制发展,使之更加适应任何地震现场和野外流动水氢观测,为早日实现地震预报做出贡献。

(上接第43页)

(〔2〕至〔5〕为国家地震局测量大队资料)

〔6〕陕甘宁地区垂直形变图及说明书

〔7〕甘肃东部地壳形变现状与地震趋势意见 (1976.12)

〔8〕关中东部地形变概况和地震趋势意见 (1977.1)

〔9〕陕甘宁部分地区形变测量结果及地震趋势意见 (1977.12)

(〔6〕至〔9〕为国家地震局第二测量大队资料)

〔10〕从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的杂音和发生

郭增建等《地球物理学报》 1977.4

〔11〕关于大地形变和力之间的关系 努尔(英)

《国外地震》(1976.6、1977.2)