

中国大陆地区巨大地震成因和预报指标的讨论

秦保燕

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文根据立交模式讨论了中国大陆地区巨大地震的成因,应用立交模式提出了与成因有关的预报指标,并结合孕震阶段的层次性提出的预报判据综合对巨震进行不同时段的地震预报(地点、强度、时间),最后以1920年海原巨震为例作了地震成因和预报的实际讨论。

一、前 言

巨大地震是指震级达7.5级和7.5级以上的地震。在这一强度范围内,震源体在孕震层(岩石圈上层)厚度方向已达到饱和。在我国大陆这类地震有广泛的分布,它们大多发生在老断层上,属粘滑型地震。在进行过古地震考察的某些地区还发现这些巨大地震在较长的近代地质史上是原地重复发生的。这就使人们提出这样的问题,一个长期活动的断层,其断层面的啮合凹凸处早已被一次又一次的地震或构造运动所错平,因此断层面的摩擦力已大大降低,很难想像这样的断层面条件能够积累巨大的剪切应变能而导致大地震的发生。此外人们也发现,地质上的活动断层是很多的,然而有些活动断层发生了大震,而有些却没有。上述这两个问题都是巨震成因的关键问题。本文试图用立交模式^[1、2]和大震孕育的线性和非线性应变的阶段^[3、4]进行巨震成因和预报指标的探讨。

二、立交模式简介

立交模式是郭增建在1985年提出的,通过近几年的研究和预报实践该模式已趋于完善^[2]。该模式的要点如下:

1. 岩石圈按其岩性、温压条件、介质力学性质分为两层。上层为脆性层,是浅源大震孕震的主要层位。下层为塑性层,是非孕震层。

2. 在岩石圈上层保留了不同构造运动时期所产生的大小不同、方向不一的断层。这些断层成为大震孕育、发生的条件 and 环境。在岩石圈下层,由于介质偏塑性,断层产生后如力源方向改变,断层会消失,因此其内产生的剪切滑移带仅与最新的构造力源有关,而与过去

的构造运动历史无关。立交模式如图1所示。

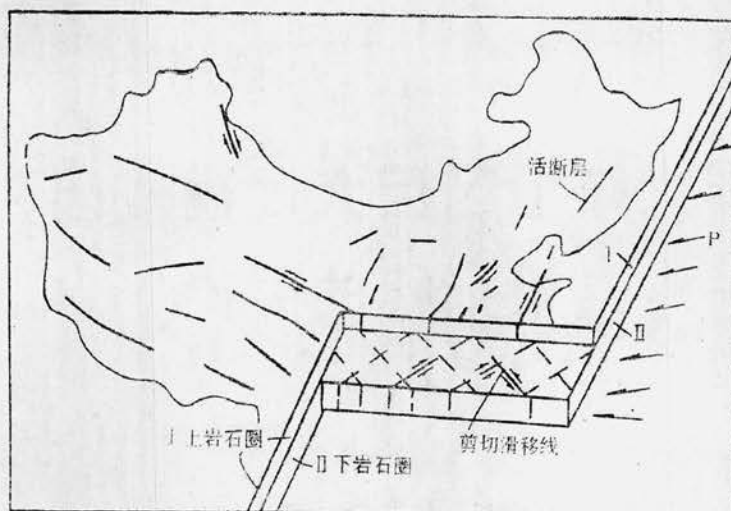


图1 立交模式简图

3. 下岩石圈内还存在另一种剪切滑移带，该滑移带内由于经常有深部热物质充填，故成为能保存很长时间的剪切带。该带的走向与构造力源方向之间没有固定的关系，即它不随构造力源方向变化而变化。在我国大陆南北地震带深部可能存在这种性质的剪切滑移带。

4. 深部蠕滑带运动指标 由于下岩石圈内不发生地震，因此深部滑移带运动是通过上岩石圈中短时、直线式的、长距离的震中迁移线来确定的。根据岩石圈多层模型的粘弹三维有限元计算，深部的剪切滑移运动能够影响到上岩石圈，且剪切带的方向不发生畸变^[5]。此外根据模拟实验，塑性介质内的断层传播可沿其原剪切面直线传播很远^[6]。由此可知，短时间、长距离、直线式的震中迁移线的位置和方向是判断深部剪切滑移带位置和方向的指标。根据塑性理论，蠕滑带的走向一般与力源方向呈45°夹角。

5. 活动断层被锁住的指标 当岩石圈下层中的剪切滑移带与其上层中活动断层发生垂立交时，滑移带的运动可使活动断层面产生扭曲，从而造成断层面凹凸啮合的锁住条件。但是否通过一次深部滑移带的运动断层就能被锁住，这需要根据立交区内是否出现空区来检验。

6. 活动断层的解锁指标 由于在临近大震前孕震断层面的凹凸体急剧形变和弱化，这时沿断层面走向和垂直于断层面走向都会出现中等地震活动，这种活动表明断层面的凹凸体有解锁情况出现，地震活动的相交区即为大震危险区。立交模式的解锁简图如图2所示。

根据有关震例的总结，解锁指标一般出现在震前1—4年。

由上所述，立交模式是一个具有成因观点的模式，因而其预报指标也与成因有密切联系。根据立交模式的锁住开始时间 t_0 、解锁时间 t_n ，其孕震时间 T 为

$$T = t_n - t_0$$

将 T 代入经验公式^[8]

$$M = 1.55 \lg T + 4.6 = 1.55 \lg (t_n - t_0) + 4.6 \quad (1)$$

即可求得未来大震强度。此外也可根据积累单元的长度 L ，按下列经验公式^[7]

$$M = 3.3 + 2.1 \lg L \quad (2)$$

求得震级，然后代入(1)式求孕震时间 T 。

对于巨大地震来说，在孕震期间其发震断层可能被深部剪切滑移带多次扭曲，从而形成较大的断层面凹凸结构。此外，巨大地震一般发生在大的块体交界带上，这样在大震发生前还会引起该块体边界的地震活动。

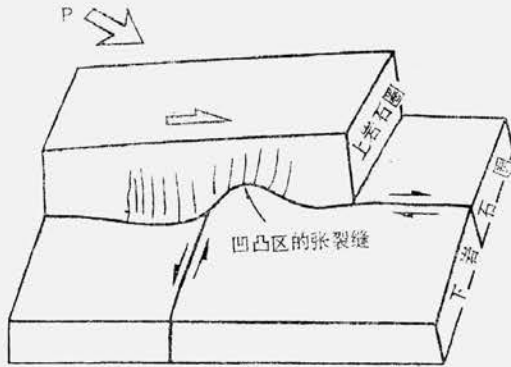


图2 立交构造解锁示意图

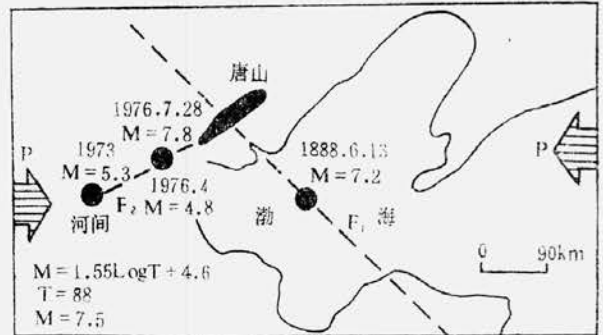


图3 唐山大震前的致锁、解锁图

三、大震孕震的线性应变与非线性应变阶段

根据作者对我国大震的孕震阶段的总结，绝大多数大震和巨震均有线性阶段和非线性阶段。对我国大陆12次大震进行统计后发现，其总的孕震时段 T 与非线性应变时段 T_n 之比在5附近摆动〔8、4〕，即

$$(T_L + T_n) / T_n = 5 \quad (3)$$

这一值实际上是标志岩石破坏的一个临界指数。这一指数的稳定性表明，大地震的发生也存在类似于现代统计物理学中突变事件前得到的普通常数。由此进一步得到震级和孕震时间的统计关系式：

$$M = 1.51 \lg T + 4.2 \quad (4)$$

$$M = 1.21 \lg T + 5.8 \quad (5)$$

其中(4)式是由7个地震的孕震时间和震级的关系建立的，而(5)式是由11个地震资料得到的。应当指出的是(4)式与前面的(1)式相近，而(5)式与(1)式相差较大。为此本文研究了孕震时间差异的原因，我们发现符合(5)式的那些地震中，在孕震期间还有更早的孕震层次。这里以1976年7月28日唐山地震为例进行说明。在文献〔5〕中，唐山大震的孕震起算时间是从1945年滦县6.25级地震开始的，但按照(1)式，显然立交时间比1945年要早得多。按照郭增建的研究，1976年唐山大震前形成立交区的时间为1888年，即通过1888年渤海7.5级地震震中作一条与近东西向的区域力源夹角为 45° 的线，该线即为推测的深部剪切滑移线。这一滑移线与唐山地区的北东向活动断层垂直立交，从而使唐山活动断层发生扭曲而形成闭锁条件(图3)。如果将1888年作为活动断层锁住开始时间，那么其孕震时间 T 应为(5)式中 T 的3倍，即其孕震时间为155年，代入(1)式可求得 M 为7.6。

唐山大震前唐山地区及其附近的地震活动的时序图表示于图4中。由图可以清楚看到两个孕震阶段，即 T_0 时段和 T' 时段，在 T_0 时段的后期1934~1945年唐山震中区附近有活动，在 T' 时段1970~1976年唐山大震发生前再次发生地震活动，而在 T_0 和 T' 时段的前期孕震区及其附近地震活动均较弱。因此可将 T_0 分为 T_{01} 和 T_{02} 时段， T' 分为 T_1 和 T_2 时段，我们可以得到

$$C_2 = T_1/T_2 = 4, \quad C = T_{01}/T_{02} = 46/11 = 4.2$$

$$C = T_0/T' = 57/(1976 - 1888) = 57/88 = 0.65 \approx 2/3$$

以上的计算表明二个阶段的孕震时间虽然不同,但孕震的线性段和非线性段时间之比相近。此外第一个孕震层次经历的时间大致为总的孕震时段的2/3,这也很有意义。根据模拟实验,扩容裂缝产生的临界应力大致为2/3的破坏应力,如果实验过程中加载应力速度为常数,那末2/3T与扩容这一物理特性将具有本质联系。除了唐山大震以外,还有一些震例表现出同样的规律性,因此这种孕震的双层次有可能为我们提供震源过程的更多信息,从而可提高预报巨震的准确度。此外上述的研究使不同方法、预报指标得到的孕震时间统一了起来,这样,根据活动断层的锁住指标、地震孕震层次以及发震时间,我们统计得到了震级与孕震时间的关系式,即

$$M = 1.308 \lg T (\text{年}) + 5.06 \quad (6)$$

$$\gamma = 0.97$$

从孕震的层次性我们可以看到,当活动断层被锁住后,孕震区仍然可能有地震活动,这种活动应当认为是孕震进程的一种表现(指标),根据这种表现我们对立交区的存在可作出进一步的肯定和否定。

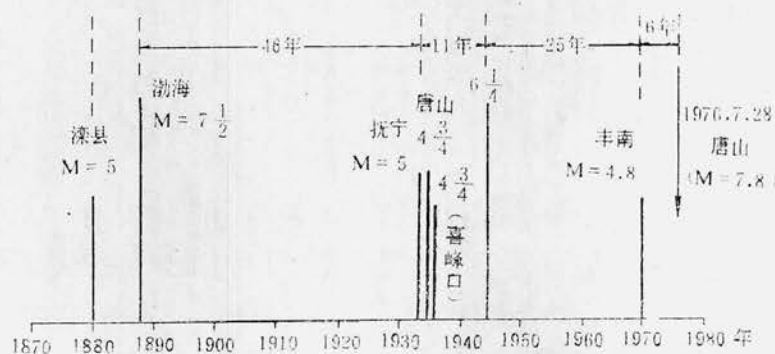


图4 唐山地区及其附近地震活动时序图

四、巨震成因和预报指标讨论

1. 巨震成因

巨震成因可以用立交模式得到完满的解释,即在构造力源作用下,岩石圈下层产生剪切滑移带,它的活动使其上部孕震层中的活动断层产生扭曲变形,从而造成凹凸啮合的断层面闭锁条件,其次该被锁住的活动断层段端部必须存在刚度低的应力调整单元。上述这两个条件就保证了巨震震源体能够积累巨大的剪切应变能。

2. 巨震发生的预报指标

将立交模式和孕震的层次所提出的预报指标进行归纳,我们认为对不同尺度的预报拟分别采用以下步骤:

(1) 长期预报 首先按震中迁移线与活动断层走向近乎正交区作为立交区。第二步研究立交区活动断层规模和活动断层分段点的具体调整单元规模,由此确定积累单元尺度代入(2)式求得M,代入(1)式或(6)式求得孕震时间T,则发震时间为

$$t_x = t_0 + T \quad (7)$$

对于巨震的长期预报来说, 其精度是比较低的, 但由于其孕震时间比较长, 所以可能已经历过多次震中迁移。它们可使断层面扭曲更厉害, 从而使断层面的闭锁条件更好, 如这种特征出现, 则应认为巨震的长期预报有充分依据。

(2) 中长期预报 当除了上述立交指标出现后, 立交区还在孕震第一层次出现了地震活动的加强, 该时段最后一次活动一般发生在总的孕震时段 $2/3T$ 处, 故由此可进行中长期巨震预报。

(3) 中期预报 当孕震进入第二个层次(T' 时段), 震源端部或附近出现地震加强活动时(非线性), 则可根据

$$T_1/T_2 = 4$$

推断巨震发生时间。此外, 在此时段的后期约在大震发生前 $1 \sim 2$ 年, 立交区会出现共轭型的地震条带活动, 这时可作出更短时间的中期地震预报。

为了清楚起见, 这里以1920年12月16日海原大震为例对巨震成因和预报指标进行实际讨论。

3. 1920年12月16日海原8.5级巨震成因和预报指标剖析

海原大震发生在甘肃、宁夏交界地区, 其活动断层走向为北西向, 根据古地震考察, 这里曾发生过多次8级以上大震, 大震的位置具有重复性, 根据海原大震的现场考察, 海原大震的发震构造走向在西部为北西西向, 东部为北北向, 从总体看为一弧形构造, 下面作具讨论。

(1) 海原大震成因

①海原大震区活动断层闭锁条件的形成 海原地区在历史上地震活动一直很弱, 而其周围地区地震活动不仅频繁, 而且强度很大。因此其孕震的起始时间一直不肯定。大震前震中位于海原地区的较大地震只有一次, 它发生在1638年, 震级为5.5。所以人们很自然地把这次地震作为孕震开始的起算时间。然而在1638年附近没有出现反映深部剪切滑移带运动的震中迁移线通过海原地区。因此1638年海原地震不能作为孕震开始的标志, 下面我们对海原大震前通过海原北西向活动断层的北北东向的几次震中迁移进行具体分析。

我们取6级和6级以上的震中迁移线进行研究。在海原大震前共有6次震中迁移, 它们均示于图5中, 由图5可见, 1477年至1481年为首次短期长距离震中迁移, 该迁移线通过海原地区的活断层; 第二次震中迁移发生在1627至1630年; 第三和第四次为1713年和1763至1765年, 其震中迁移的延伸线通过海原活断层; 第五次为1884至1889, 由图可见, 在海原大震发生前北

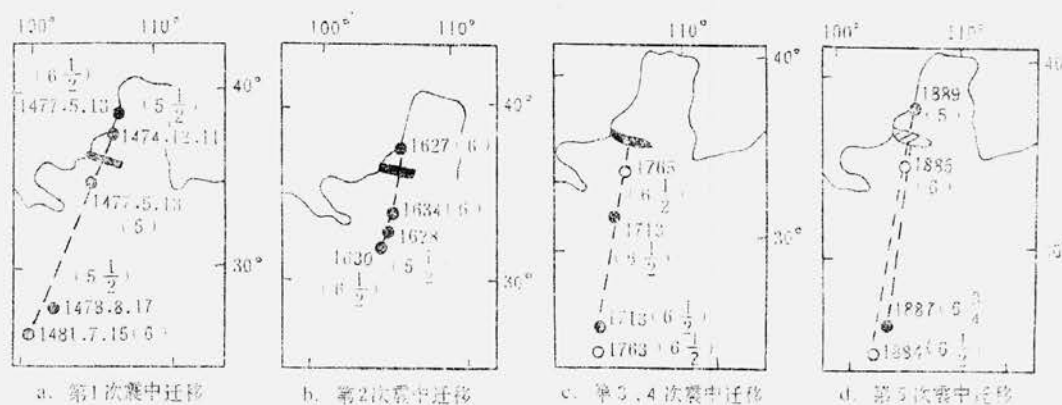


图5 海原大震前岩石圈下层多次剪切滑移带运动引起的短期长距离震中迁移

西向的海原活断层被深部剪切滑移带多次扭曲过,因此海原活断层被强烈扭曲并形成闭锁条件。用立交开始时间,1477年作起算时间,其孕震时间为443年,将此值代入(1)式可得海原地震的预测震级为8.52。此外这一孕震时间还符合孕震过程的层次。图6给出了海原大震区及其附近的6级和6级以上地震的时序图,由图6可见,在T孕震时段后期,即1709至1765年在海原孕震区及其周围地震活动有明显加强。在T'孕震时段的后期又出现了地震活动的明显加强,它们的分时段之比为

$$T_{01}/T_{02} = 230\text{年}/56\text{年} = 3.97 \approx 4$$

$$T_1/T_2 = 123/32 = 3.8 \approx 4$$

$$T_0/T = 0.65 \approx 2/3$$

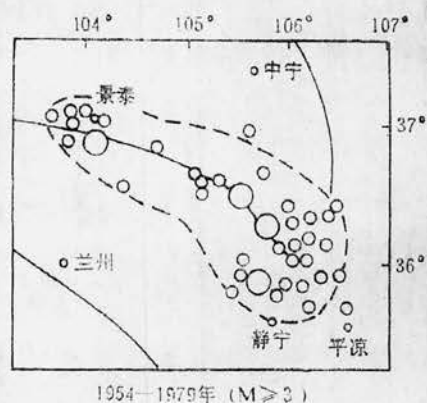
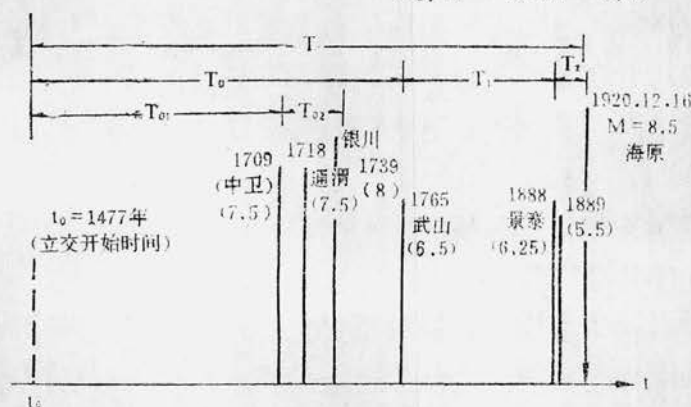


图6 1920年12月16日海原大震孕震阶段性

图7 海原大震极震区内震后中小地震活动

这一孕震层次的总时间T与由立交模式得到的致锁至发震的孕震时间相一致,由此我们认为1477年作为海原大震孕震开始时间是可信的,是有根据的。

②海原大震的震源体的应力调整单元 根据海原地区的发震构造考察,海原大震孕震区的西端为景泰地区。该区震前不仅有中强地震活动,而且还是地震活动带反映的构造交汇区。地震活动带走向南北并通过景泰地区,海原大震区东端为固原地区。该区亦为构造交汇区,其地震强度和频度都较高。根据海原大震区现代小震活动(图7),海原大震区的线性长度可达300km左右^[9],将此值代入(2)式,可求得预测震级为8.5级。

(2)海原大震的预测指标 在前面我们已论述了一部分预测指标,但为系统起见下面按不同时间尺度预测。

①海原大震的长期预报 根据1477年至1481年震中迁移线横向穿过海原北西向活动断层以及景泰和固原构造交汇区(调整单元)之间海原活动断层的线性长度(约250km),由(1)式和(2)式可求得震级为8.25级,孕震时间为230年,故预测发震时间为1707年,很显然地震的长期预测精度较差,它与实际发震时间之差达100多年。

②海原大震的中长期预报 从1477年至1709年海原地区及其周围地震活动强度频度较弱,仅1622年固原地震达到7级,然而从1709至1765年间,海原地区及其周围地震活动强度和频度明显加强。因此该时段可认为是海原孕震期间第一次非线性应变积累的显示。且1477—1709和1709—1765这二个时段之比恰好在4附近,按第一孕震时段T约为全孕震时段T的2/3推算,海原大震的孕震时间T应为:

$$T = T_0 \times 3/2 = 288 \times 3/2 = 432\text{年}$$

发震时间为

$$t_x = 1477 + 432 = 1909 \text{ 年}$$

上述计算表明, 中长期预报的精度比长期预报精度有所提高。

③海原大震的中期预报 海原大震的中期预报主要是根据第二个孕震层次中1885~1889年海原地区周围6级左右地震确定的。如以1888年景泰地震作为该层次的分段点(景泰地震位于海原大震区端部),则从1765至1888年经过了123年(T_1),按 $T_1/T_2 = 4$ 推算,其发震时间应为

$$t_x = 123 + 31 + 1765 = 1919 \text{ 年}$$

此外1917~1920年大震前沿着北西西向海原大震的延伸方向发生震中迁移。沿北北东向的南北地震带也有相应活动,前者的活动是海原断层面解锁的指标(图8)。因此可预计1918~1922年间海原可能发生大震。另外根据块体周围地震活动(图8)和火山活动区的地震活动也可作出推断(图9)。

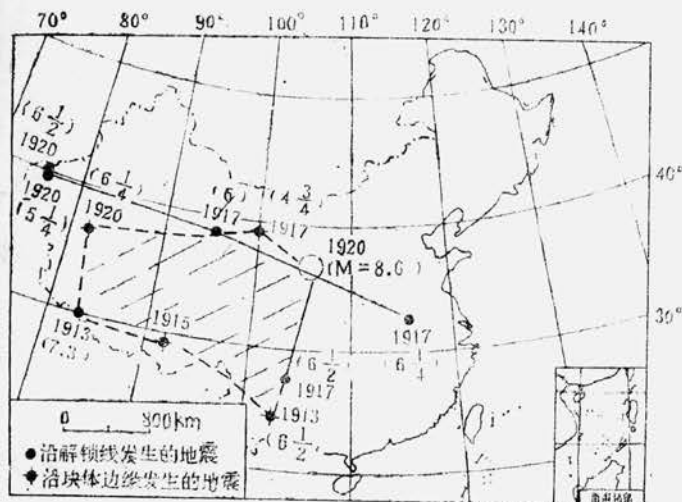


图 8 海原大震前 1—3 年的地震活动

以上是对海原大地震成因和预测的初步讨论。由于是回顾性的检验,因此预报的难度小。在未发生大震前,孕震层次的判断有时会出现困难,特别是巨大地震,它与周围地震的相互作用可造成十分复杂的时空分布,但将立交模式和孕震层次结合起来,再加上别的判据指标,作者认为有可能作出不同时间尺度的大震预报,由此对近几百年或100年内不发生巨震的活动断层作出低地震危险性评价。

应当指出的是,我们研究的震例还偏少,特别是不同孕震层、 α 和不同孕震层次之间分段时间之比的稳定性及变化范围尚待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 郭增建, 立交模式及其在地震预报中的应用, 西北地震学报, Vol. 7, No. 1, 1985.
- [2] 郭增建, 由立交模式讨论地震预报, 西北地震学报, Vol. 7, No. 2, 1985.
- [3] 秦保燕, 大震前复杂震源系统的非线性阶段和大震预报, 西北地震学报, Vol. 8, No. 4, 1986.
- [4] 秦保燕, 大震前复杂震源系统非线性阶段的多层次及大震的中、短、临预报, 西北地震学报, Vol. 9, No. 1, 1987.
- [5] 白超英、秦保燕, 深部剪切形变带对浅源地震的控制, 西北地震学报, Vol. 12, No. 1, 1990.
- [6] О. Г. Шамина, А. А. Павлов, Ю. Ф. Копничев, Исследование процесса подготовки трещины, Физика Земли, No. 8, 1973.
- [7] 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.
- [8] 兰州地震大队分析组, 用地震资料推断近期地震危险区, 地震战线, No. 8, 1971.
- [9] 秦保燕、陈家超、冯霞英, 利用现代小震活动性资料确定历史大震震源区, 地震, No. 1, 1989.

(下转第16页)

- [3]郭增建、秦保燕、陈家超, 新生代以来玄武岩喷发区与震中迁移始发点——兼论三层模式, 西北地震学报, 增刊, 1988.
- [4]国家地震局, 中国地震前兆资料图集, 地震出版社, 1984.
- [5]秦保燕, 大震前复杂震源系统的非线性阶段和大震预报(一), 西北地震学报, Vol. 8, No. 4, 1986.
- [6]郭增建、秦保燕、徐文跃、汤泉, 地震孕育模式的初步讨论, 地球物理学报, Vol. 16, 1973.
- [7]兰州地震大队, 用地震资料推断近期地震危险区, 1971年全国测震会议论文, 地震战线, No. 8, 1971.

DISCUSSION ON LOCKING AND DISLOCKING INDICES
OF ACTIVE FAULTS AND PREDICTION OF
GREAT EARTHQUAKES IN CHINESE CONTINENT

Qin Baoyan, Tan Aina, Bai Jianhua

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)

(上接第7页)

DISCUSSION ON CAUSE AND PREDICTING INDICES OF LARGE
EARTHQUAKES ($M_s \geq 7.5$) IN CHINESE CONTINENT

Qin Baoyan

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)