

我国大陆活动断层锁住、解锁指标与 大震预报问题讨论

秦保燕 谭爱娜* 白建华

(国家地震局兰州地震研究所)

前 言

近几年来,随着对地震成因的深入研究,进一步提出了经过长期活动的活断层何以能锁住并孕育大震的问题。1985年郭增建提出了立交模式^[1],解释了活动断层的重新锁住和相应的预报指标。1986年,郭增建、秦保燕对该模式作了进一步的完善^[2],1987年郭增建、秦保燕、陈家超又提出了考虑地球自转的三层立交模式^[3]。至此,物理模式研究基本完成并在实际地震预报中作了应用,取得了一定效果。1988年秦保燕为了完善该模式提出了用三维粘弹多层地壳模型模拟计算深部剪切蠕滑断层对浅部断层的作用,白超英在秦保燕和宋惠珍的指导下完成了立交模式的模拟计算,计算结果表明立交模式成立。此外为了更系统地用地震资料对大震孕育、发震以及震后过程进行研究,从而使地震预报指标更为明确,提出了组合空区作为大震前地震异常活动的基本类型,并对大震前地震条带成因作了进一步的讨论。本文应用立交模式的基本原理对我国11次($M \geq 7.0$)大震从活动断层锁住直至发震这一过程所呈现的预报指标作了列举,并讨论了大震预报问题。

一、活动断层的锁住指标

根据立交模式的观点,活动断层的锁住指标是:

1. 活动构造的垂直立交区

在构造力源作用下在岩石圈下层会产生剪切蠕滑断层,当它通过活动断层底部且与之垂直立交时,可致使活动断层产生扭曲变形,从而使活动断层面形成凹凸啮合而闭锁,其相应的初定闭锁指标是深部滑移线诱发的短期、长距、直线式的震中迁移线与活动断层的交汇区,此交汇区即为立交区。图1是我国14次大震($M \geq 7.0$)区活动断层锁住指标图。对于某些特大地震,震前孕震断层下部往往还有多次剪切蠕滑线垂直通过,从而使断层面上的凹凸区愈来愈大,形成巨大闭锁区,导致孕育巨震的条件,如1920年海原大震。

* 浙江省地震局。

2. 活动断层锁住后形成的组合空区

由于活动断层面的差异, 图1所反映的立交区不一定表明活动断层已被锁住, 它必须进一步由组合空区来说明。因为活动断层锁住后在活动断层周围会产生一些地震活动, 特别是孕震断层端部的调整单元、断层面的凹凸交界区, 它们都是剪应力比较高的地区。由于孕震断层面凹凸区附近发震的调整能力低, 因而地震强度会低于调整单元区, 一般强度在5级以下。在凹凸区锁住的部位和影响区, 由于调整能力很差而出现空区, 而外围相对有中强震活动, 这样就形成组合空区图象。限于篇幅, 下面仅举一、二例作说明。

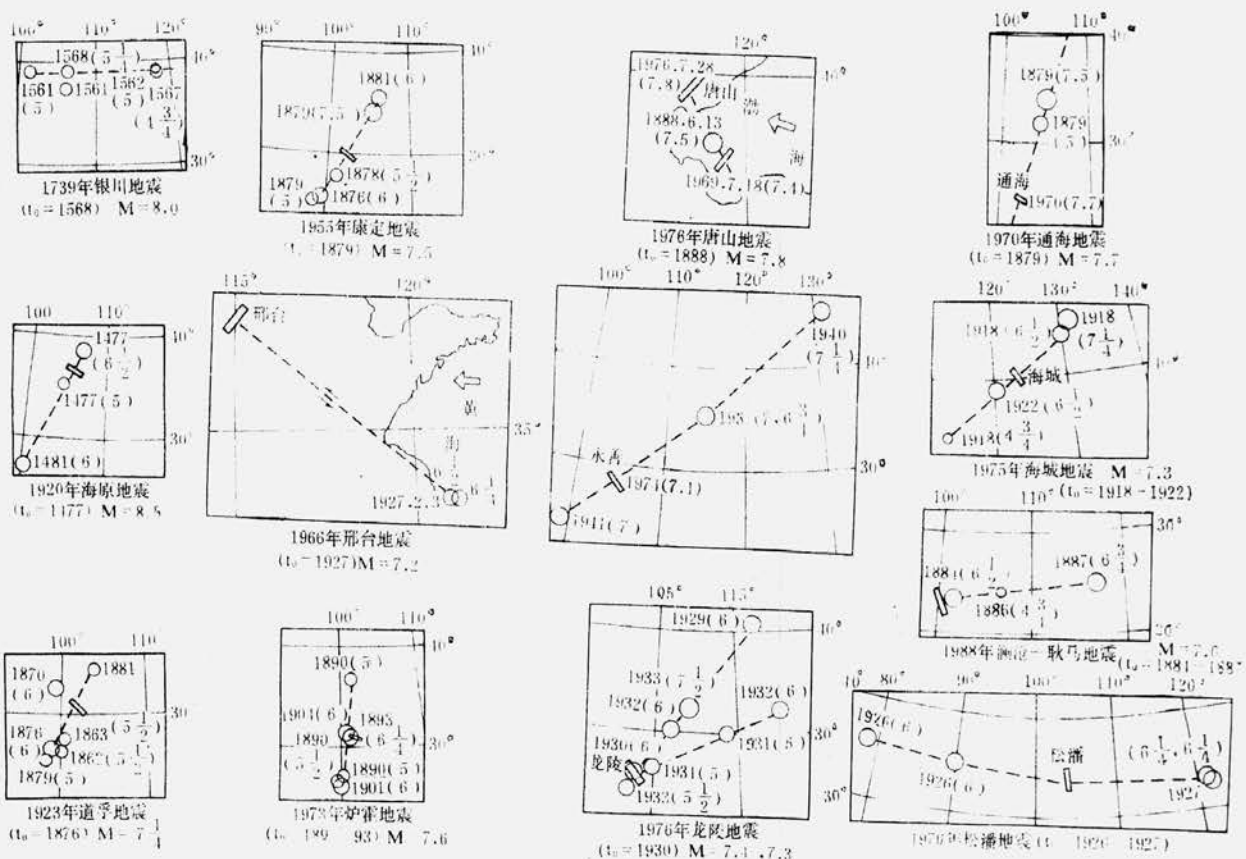


图1 14次大震 ($M \geq 7.0$) 前活动断层锁住指标图

(1) 唐山大震 唐山大震的发震构造为北东向。1888年渤海发生大震, 推断该震的发震构造为北西向。地震时震源断层面所产生的大幅度错动可通过层间耦合传递到岩石圈下层并导致其产生北西方向的剪切蠕滑断层, 它运动时又导致北东向的唐山活动断层发生扭曲变形而锁住, 该断层锁住后其空区图像如图2所示。由图2可见, 大震前唐山孕震断层的北东端和西南端均有明显的地震活动, 而在锁住区亦有中强地震活动, 很显然, 这种图像比较符合断层面凹凸区锁住指标以及孕震断层端部调整单元的调整指标, 前者为锁住区中最大剪切部位发生中、小地震活动, 后者是调整单元运动导致震源端部剪应力集中引起中、小地震活动。

(2) 1920年12月16日海原8.5级地震 这次大震的发震构造为北西西向, 在历史上曾有多次古地震在此段重复, 因此这是一次典型的粘滑型地震。这次大震发生前北西西向活动断层在1477年被北北东向的深部剪切带锁住, 此后沿南北地震带的多次活动导致北西西向孕震断层面形成巨大的凹凸啮合, 从而形成巨震。考察活动断层锁住后的地震活动图像(图3)可以看出在北西西向的海原孕震断层上, 震前震中区海原有活动, 其两端调整单元——景泰

和固原有明显活动, 且活动强度较大。这一图像是符合断层面凹凸区闭锁条件和断层端部单元的调整运动特征的。

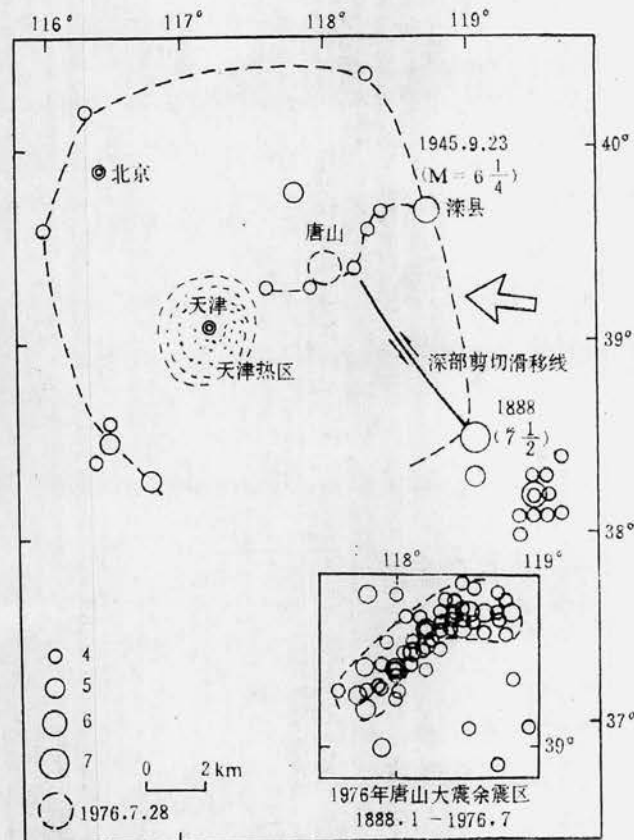


图2 唐山地震前断层闭锁后的组合空区图像 (1888.1—1976.7.27)

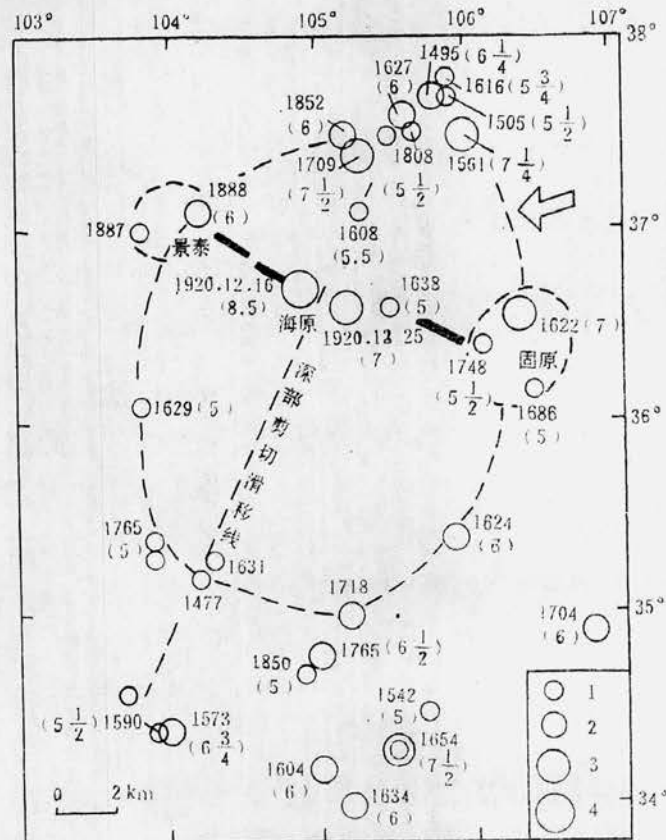


图3 1920年海原大震前组合空区图 (1477.1—1920.11)

1. $M \geq 5$ 2. $M \geq 6$ 3. $M \geq 7$ 4. $M \geq 8$

关于地震空区曾被我国地震学者广泛研究过，郭增建和本文第一作者还曾根据中国西北地区大震前空区的持时建立了孕震时间 T 与震级的关系式：

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

式中 T 以年为单位，以往虽然对空区的成因进行过物理解释，但由于没有联系孕震断层凹凸体的存在以及在孕震过程中凹凸体的剪切变形、弱化等基本事实，因对空区的成因解释是不完整的。根据立交模式的基本观点，应用组合空区取代目前的空区含义，比较合理。比较完整的空区成因应当是：

a. 活动断层锁住后出现组合空区图像，锁住开始时间即可作为孕震开始时间，因此空区的研究应当有起始时间。

b. 深部蠕滑断层与地壳上部活断层的垂直立交区即活断层凹凸区为剪切变形最强烈的地区，在震前该区一般有中、小地震活动。震时该区为始破裂区（震中区），它还可能是震前的预位移活动区。由此还可对粘滑型大震大多为双侧破裂型地震作出解释。

c. 活动断层面上重新形成凹凸区后由于断层两盘咬接很紧且毫无松动的可能，使变形受阻，提高了介质强度，从而造成地震空区而外围相对活跃。

d. 孕震断层端部是应力调整区，它将大区域的应力转移集中到孕震断层端部，因而震前调整区地震活动频度高，它是孕震断层孕震过程的反映。

应当指出的是由于孕震断层凹凸体剪切变形会导致中小地震活动，因而在勾画空区时会出现双空区图象，主震震中就位于双空区交界带上，很多主震多发生在空区边缘，这些都是地震孕育过程中形成组合空区图像的反映。此外必须强调锁住断层凹凸区及其调整单元的地震活动在预报大震中的重要作用。这里举1975年海城大震和1976年唐山大震两例来说明，图4和图5是陆远忠同志提供的空区。

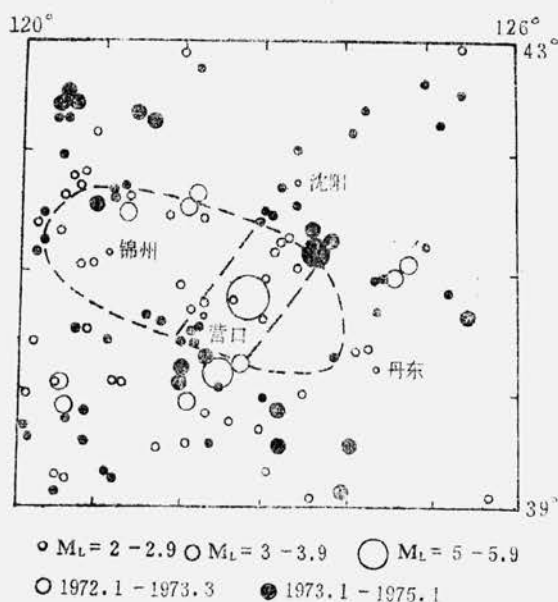


图4 海城7.3级地震前空区内条带活动

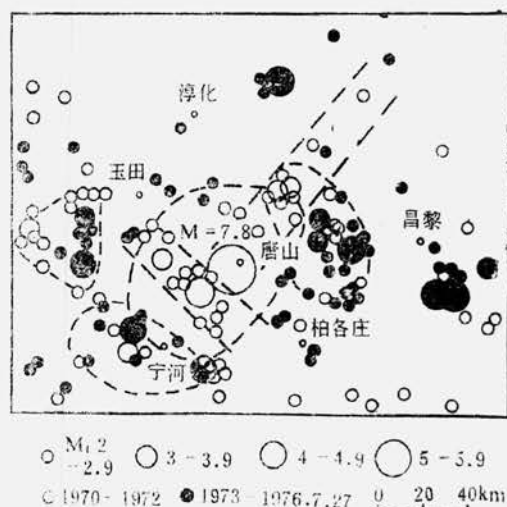


图5 唐山7.8级地震前空区内条带活动

这两个图分别表示了在大震前三年和六年内的活动图像。由图可见在未来震中区且垂直于发震构造方向上均出现了小震比较密集的条带，此条带分别在震前2年和3年趋于平静，这种图像典型地说明了断层凹凸区在孕震后期的变形和弱化，因此这种图像显然是大震的中

期预报指标。

以上是对大震前形成组合空区图像的初步认识。应当指出的是有些空区内部没有上述特征的中小地震活动,对于这种空区类型,一种可能是断层面上的凹凸区不够大,因此它相应震级应偏小。关于这个问题应当作更深入的研究方能给出更定量的结果。

二、孕震断层解锁指标

孕震断层的解锁表现在以下2个指标上。

1. 调整单元解锁指标

在大震前几年,首先在孕震断层端部调整单元出现明显的中强地震活动,这种活动为断层面上凹凸区的松动和解锁准备了条件。根据我国12次大震的统计,调整单元中强震开始加强活动至大震发生之间的时间间隔 Δt_s 与震级具有一定的相关性^[5],其 Δt_s 与M之间的相关统计式为:

$$M = 6.5 + 1.3 \lg T_s \quad (2)$$

应当指出的是孕震断层有两个调整单元,它们的加强活动时段不是同时出现的,此外活动的强度也不等。因此在临近大震前往往只有一个调整单元出现明显活动,此活动后在整个震源区出现平静状态(指无中强震活动)直至发震。

2. 断层面凹凸区解锁指标

在调整单元出现中强地震活动后震源端部的应力集中加强,并使断层面上凹凸区的变形进一步发展,在凸区会产生张性微裂缝并导致凸区弱化。显而易见它的弱化将致使孕震断层解锁。此外在凹凸区之间存在着较大的剪应力和剪应变,并形成剪应变较大的带,此带与孕震断层垂直。由于该带的存在,凸区弱化后可导致沿该带发生小震活动,如前面的海城和唐山大震空区内的垂直于发震断层的小震条带活动(图4和图5)。当震源区出现解锁时,凹凸区之间的剪应变较大时它还可影响岩石圈下层产生共轭型的长而直的剪切蠕滑线,然后再反馈到岩石圈上层诱发短期、长距震中迁移(中强震)形成较大范围共轭型地震条带活动。这就是断层面上凹凸区弱化引起的外围解锁指标。上述震源内外的共轭型地震活动条带虽然出现时间不同,但其位置方向是一致的,它们的交汇区即为未来大震的震中区。图6列出了12次大震前震源外围区共轭型地震活动图。由图可见,大多数大震前共轭型地震条带既与发震构造也与深部蠕滑线的剪切网络方向相近。因此这种共轭地震带是与震源孕震到最后这一过程有关的,同时当解锁线与深部蠕滑运动方向一致时,会更促进上述解锁作用。

3. 孕震断层面凹凸区解锁条带

震源内外共轭型地震活动条带的出现显然是与断层面上凹凸区弱化引起孕震断层面解锁有关。但各地区地震活动条带的形成方式和形成过程仍呈现不同的特点。这与各地震活动条带所处的具体环境有关,如浅部断层与深部剪切滑移线可以重合、正交或成一定交角,而与立交构造的夹角不同,其应力积累或释放速率也将不同。此外,各地区、各地质构造单元的差异,活动断层产生的扭曲体的剪切变形程度也各不相同,从而使各地震活动条带形成的解锁方式也不尽相同。因而在各地震活动条带的形成过程中是不同的,这样就会对判别大震前的解锁指标带来困难。根据立交模式的观点,只有当浅源大震前地震的解锁条带活动与深部的剪切滑移网络基本上比较接近或一致时,解锁条带的延伸才能实现。因此图6中所

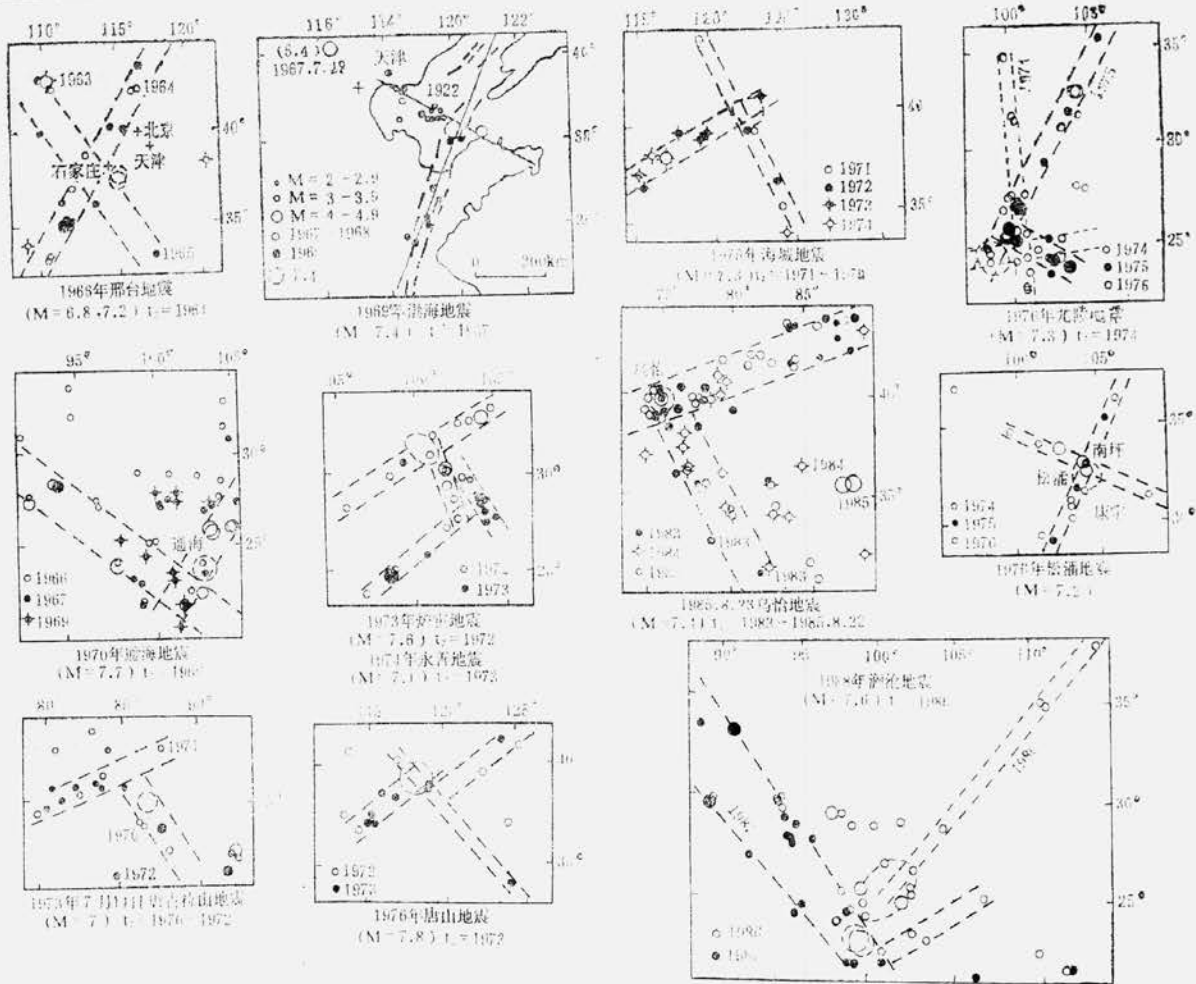


图6 大震前孕震断层解锁指标图

画出的解锁条带是按上述原则做出的。此外临近大震前的解锁条带中地震之间的间距均比无大震背景的地震带内的地震间距要小得多，这种情况与大震前震源区和其外围应力水平相当高有关。

为了进一步研究解锁时间与震级的关系，我们在表1列出了12次大震前地震解锁条带出现时间 t_2 以及解锁开始至发震时间 Δt_2 的统计表，以便为地震的中期预报作参考。

表1 解锁条带与解锁开始时间

序号	地震日期	地点	M	解锁条带走向方位	解锁开始时间 t_2	Δt_2 (年)
1	1966.8.22	邢台	7.2	NE,NW	1964	2
2	1969.7.18	渤海	7.4	NW,NNE	1967	2*
3	1970.1.5	通海	7.7	NE,NW	1966	4
4	1973.2.6	炉霍	7.6	NE,NW	1972	1
5	1973.7.14	唐古拉山	7.3	NE,NW	1972	1
6	1974.5.11	永善	7.1	NW,NE	1973	1
7	1975.2.5	海城	7.3	NNW,NE	1971	2
8	1976.5.29	龙陵	7.4	NW,NE	1973	3
9	1976.7.28	唐山	7.8	NE,NW	1974	2
10	1976.8.16	松潘	7.2	NNW,NE	1974	2
11	1985.8.23	乌恰	7.4	NE,NW	1983	2
12	1988.11.6	澜沧	7.6	NE,NW	1986	2

*渤海地震的解锁震级为 $M \geq 2.0$ ，其余各次地震的解锁震级均为 $M \geq 4.0$

由表1可以看出，我国12次大于或等于7.0级地震的解锁时间大多集中在震前1—2年，

最长为4年。

三、大震预报问题讨论

前面我们已从成因的角度讨论了我国7级和7级以上大震的预报指标。由这些指标可以看到大震孕育的阶段性的,即从开始锁住,出现组合空区,解锁阶段至发震,特别是解锁阶段存在着比较急剧的时空演化,这为我们进行大震预报提供了依据。为了进行大地震的三参数预报,表2列出了地震锁住时间T与实际地震震级的数据。

表2 地震锁住时间统计表

序号	地震日期 t_e 年 月 日	M	地震闭锁开始时间 t_0 (年)	闭锁持时 $T = t_e - t_0$ (年)	$\lg T$
1	1739.1.3	8.0 银川	1561	178	2.25
2	1920.12.16	8.5 海原	1477	443	2.65
3	1923.3.24	7.25 道孚	1876	47	1.67
4	1955.4.14	7.5 康定	1879	76	1.88
5	1966.3.22	7.2 邢台	1927	39	1.59
6	1969.7.18	7.4 渤海湾	1888	81	1.91
7	1970.1.5	7.7 通海	1879	91	1.96
8	1974.5.11	7.1 永善	1940	34	1.53
9	1975.2.5	7.3 海城	1918	57	1.76
10	1976.5.29	7.4 龙陵	1931	45	1.65
11	1976.7.28	7.8 唐山	1888	88	1.94
12	1976.8.16	7.2 松潘	1933	43	1.63
13	1988.11.6	7.6 澜沧	1887	101	2.0
14	1973.2.6	7.6 炉霍	1890	83	1.92

由表2中的数据可作出孕震时间T与M的相关图(图7)并得到如下的统计关系式:

$$M = 1.308 \lg T + 5.06 \quad (3)$$

$$r = 0.97$$

根据(3)式,当已知预测强度时,由此式可估计发震时间。当已知解锁时间和致锁时间时,则可反推未来大震强度。下面对大震预报问题作具体讨论。

1. 大震长期预报

如前所述,大震的长期预报指标主要依赖于活动断层是否有立交指标,立交后是否出现组合空区。一般编制50~100年地震区域图时利用立交指标和组合空区以及被锁住的活动断层长度(由构造分段指标来确定)联合推求大震三参数预报指标。例如已知某活动

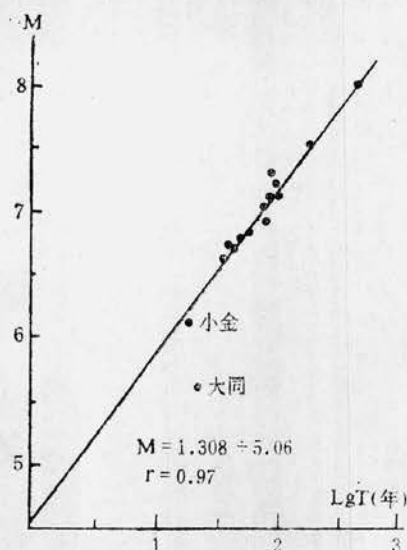


图7 孕震时间T与M的相关图

断层与短期长距直线式震中迁移线(反映深部剪切蠕滑断层的运动位置和方向)相交,则相交区可初定为活动断层被锁住区,利用构造分段确定被锁住的孕震断层长度L,代入下列公式:

$$M = 3.3 + 2.1 \lg L \text{ (km)} \quad (4)$$

求得 M_1 ,将此 M_1 代入下式

$$M = 1.3081 \lg T + 5.06 \quad (3)$$

得孕震时间 T_1 ，则发震时间即为：

$$T_{x1} = T_1 + t_0 \quad (6)$$

式中 t_0 为活动断层被锁住的开始时间。

然后进一步考察该立交区是否出现前述的组合空区图像，如出现组合空区图像，则上述立交区可肯定下来，同时利用组合空区显示的尺度 L_2 并利用(4)、(3)、(6)式分别求得震级 M_2 、孕震时间 T_2 和发震时间 t_{x2} 。很显然，由于空区尺度 L_2 与活动断层段 L_1 不一定相等，这时最后求得的震级和发震时间都有一差值，即：

$$\Delta M = M_1 - M_2$$

$$\Delta T_x = T_{x1} - T_{x2}$$

ΔM 和 ΔT 可作为震级与发震时间的初定误差，据此可得出50或100年内7级和7级以上大震的位置、震级范围和发展时段。为使地震预报部门便于参考，表3列出了震级 M 、孕震时间 T 、断层长度 L 的相关表。

表3 震级 M 、孕震时间 T 、断层长度 L 相关表

震级 M	孕震时间 T (年)	断层长度 L (km)
8.5	427	302
8.0	177	173
7.5	73	100
7.0	30	57
6.5	13	34
6.0	5	20

2. 大震的中期预报

大震的中期预报主要根据反映凹凸区解锁的通过未来震中区的共轭型地震条带活动开始时间 t_a 来确定。由于 t_a 离发震时间较近，加上已知致锁开始时间 t_0 ，因此可粗略估计未来大震震级，然后代入(1)式求得 Δt_0 ，这样得到发震时间 T 的精度可比长期预报大大提高。同时由于在临近大震前中小地震的组合空区尺度更接近于实际大震的孕震区尺度，因此可利用其尺度求得相应震级 M ，再推算发震时间。

应当指出的是上述预报过程是统一的，即始终在同一地区进行。

四、结束语

由上所述，大震的孕育和发生与活动断层上凹凸体的重新形成关系十分密切，其预报指标直接与凹凸区受力变形和弱化有关，本文仅通过12个震例进行了定性讨论，对凹凸体受力变形及弱化的细节研究是不充分的，这有待于通过模拟实验进一步揭示其规律性。

通过震例总结可以认为，立交模式是一个目前最接近实际粘滑型地震的成因模式，值得在地震预报中使用以减轻大震的灾害。

参 考 文 献

〔1〕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.

〔2〕Guo Zengjian, Qin Baoyan, Discussion on the determination of potential large earthquake source by means of the stereographic cross model, Proceedings of International Seminar on Seismic Zonation, PP. 227-234, 1987.

- [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*)