

# 强震的孕育规律与孕震模式

秦四清<sup>1</sup>, 熊巨华<sup>2</sup>, 薛雷<sup>1</sup>, 黄鑫<sup>1</sup>, 王媛媛<sup>1</sup>, 泮晓华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029;

2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对强震能否预测以及如何预测的科学难题, 建立孕震断层多锁固段脆性破裂理论, 发现强震孕育过程的指数规律:  $s_f(k) = 1.48^k s_c$ , 其中  $s_f(k)$  和  $s_c$  分别为第  $k$  个锁固段断裂点与第一个锁固段膨胀起点对应的累加 Benioff 应变, 可以利用锁固段在其变形膨胀点处开始发生的震群事件(加速性地震活动前兆)预测未来大震, 并给出了强震四要素相关预测方法。通过对诸多历史强震(如邢台地震、海城地震、汶川地震、玉树地震等)的回溯性检验分析表明: 强震可以预测, 且其孕震过程都遵循着上述简单的共力学规律。在此基础上, 归纳出 4 种典型强震的孕震模式, 即大震震级呈“大—小—大”型, 大震震级呈连续上升型, 锁固段快速连续破裂型与标准型。此外, 根据相关强震预测理论方法, 对有关抗震救灾未来研究的方向提出如下建议: 建议加强活动断裂位置精确定位、性质判定的地震地质研究, 并开展孕震区锁固段(闭锁区域)判识的地质与地球物理研究等。

**关键词:** 锁固段; 强震预测; 孕震模式; 震群; Weibull 分布模型; 地震

**中图分类号:** P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)03-0311-06

## Seismogenic Law and Mode of Strong Earthquakes

QIN Si-qing<sup>1</sup>, XIONG Ju-hua<sup>2</sup>, XUE Lei<sup>1</sup>, HUANG Xin<sup>1</sup>, WANG Yuan-yuan<sup>1</sup>, PAN Xiao-hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Aiming at whether the strong earthquake can be predicted and how to predict, the brittle failure theory of multiple locked patches in a seismogenic fault system is developed. An exponential law describing the seismogenic process of strong earthquakes ( $s_f(k) = 1.48^k s_c$ ) is found where  $s_f(k)$  and  $s_c$  are cumulative Benioff strain corresponding to the rupture point of the  $k$ th locked patch and dilation point of the first locked patch respectively,  $k$  is the number of locked patches. In other words, the oncoming strong earthquake can be predicted by utilizing the earthquake swarm events (accelerating seismicity precursor) produced in the dilatancy onset point of locked patch. Furthermore, associated prediction method, including the magnitude, place, critical strain (corresponding to the occurrence time of earthquake), and the hypocentral depth of the oncoming strong earthquake are provided based on this new method. Then many earthquakes (such as Xingtai Earthquake, Haicheng Earthquake, Wenchuan Earthquake, Yushu Earthquake and so on) were retrospectively analyzed. The results indicate that the seismogenic process of strong earthquake obeys a simple mechanic law. The seismogenic mode can be classified into the following four types: large-small-large earthquake magnitude mode in a seismogenic period, continuously rising large earthquake magnitude mode in an earthquake sequence, quickly and continuously fracturing mode of multiple locked patches, and standard earthquake mode. Moreover, the future research focus in the earthquake relief is also suggested.

**Key words:** locked patch; prediction of strong earthquake; seismogenic mode; earthquake swarm event; Weibull distribution model; earthquake

## 0 引言

地震预测是公认的世界性科学难题, 是地球科学一个宏伟的科学研究内容。如能同时准确预测出

未来大地震的地点、时间和强度, 无疑可以拯救数以万计乃至数十万计生活在地震危险区人民的生命; 并且如果能预先采取恰当的防范措施, 就有可能最大限度地减轻地震对建筑物等设施的破坏, 减少地

收稿日期: 2011-01-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-113; KZCX2-YW-Q03-02113); 国家自然科学基金重点项目(41030750)

作者简介: 秦四清(1964-), 男, 河北行唐人, 研究员, 从事工程地质与岩土工程研究。E-mail: qsqhope@sohu.com

震造成的经济损失,保障社会稳定和促进和谐发展<sup>[1]</sup>。尽管人类在地震学研究中已作出巨大努力,也提出不少孕震理论与预测方法,如地震空区-应力影区模式<sup>[2]</sup>、红肿理论<sup>[3]</sup>、区域-时间-长度方法<sup>[4]</sup>(RTL)、图像信息学方法<sup>[5]</sup>(PI)、增加概率的时间方法<sup>[6]</sup>(TIP)、AMR/DMR 时间-破坏方法<sup>[7]</sup>等,但这些预测理论和方法大多与岩石破裂力学过程脱节,与孕震历史过程脱节,且基本都有多解性,应用于实际地震四要素预测还有很长的距离。

正如许多地震学家所指出的,地震预测的进展主要受到地球内部的“不可入性”、大地震的“非频发性”以及地震物理过程的复杂性等困难制约,因此有前景的地震预测方法在目前不能实现,似乎在不远的将来也难以实现<sup>[8]</sup>。Geller 等基于地球系统总是处于自组织临界性的观点,甚至断言“地震不能被预测”<sup>[9]</sup>。

笔者认为这些悲观的观点纯属误导,经过不懈努力,任何科学难题终将被突破,地震预报也不例外。大地震为何难以预测呢?其根本原因不在于监测技术手段的不足,而在于缺乏对孕震共性规律的认识及预测理论方面的创新与突破。

笔者认为,科学的强震预测理论应具有以下特点:①以地震地质资料为划定孕震时空区域的基础;②与岩石破裂演化过程密切相关;③基于长期可靠的地震活动性监测数据,如地震目录等,掌握岩石的破裂程度;④能通过所有历史强震震例的检验,具有广泛的普适性;⑤既能预测“地震”,也能预测“不地震”。

为此,笔者就地震预测尤其是强震预测可行性进行研究,鉴于篇幅限制,读者若想更好地了解相关背景知识,建议参阅笔者近期所发表的一系列强震预测新理论文献<sup>[10-18]</sup>。为方便起见,首先对笔者近期提出的锁固理论与相关预测方法做简单介绍,然后通过对国内外典型大地震的回溯性预测验证,总结出几种典型的孕震模式,以深化地震预测科学的研究。

## 1 孕震断层的多锁固段脆性破裂理论

经过较长时间的探索,笔者于 2009 年 7 月提出了适用于地震、滑坡、崩塌、岩爆预测的锁固理论,希望揭示这些破坏现象的本质机理。对从文献上能收集到的 105 个地震实例、40 个崩滑实例、5 个岩爆实例的验证分析表明,锁固理论能可靠地用于地质体灾变的失稳预测分析,迄今为止,对可搜集到的历史强震案例分析还未发现反例。

只要人类依靠现有技术能识别或能捕捉到显著的地震前兆或异常现象,并且这种前兆或异常在每次

大震前都能重复观测到,那么强震一定能够预测。是否存在这种具有普适性的前兆现象呢?答案是肯定的。通过室内岩石三轴压缩声发射实验<sup>[10]</sup>知道,地震像室内岩样加载破裂过程一样,在岩石变形到其体积膨胀点时,微破裂会向未来的主破裂面丛集,出现震群,震群是唯一的大地震活动性前兆,建立了震群与未来大震的力学联系,则大震预测问题就迎刃而解。

已有研究发现,断层的运动模式和相关的地震活动性受断层中一个或多个锁固段所控制<sup>[19]</sup>。一旦所有的锁固段被突破,主震将不可避免地发生。笔者应用重正化群理论导出了锁固体在其体积膨胀起点的临界破坏概率,基于材料脆性破坏的 Weibull 分布模型给出了单锁固段断裂点(大地震发生)与体积膨胀起点位移或应变(图 1)的表达式<sup>[11-12]</sup>

$$s_f = 1.48s_c \quad (1)$$

式中: $s_f$ 、 $s_c$  分别为对应锁固体断裂点与膨胀起点的应变或位移。锁固体变形到膨胀点时,微破裂会向未来的主破裂面丛集,震群出现,在蠕变位移-时间曲线上表现为位移加速现象<sup>[11]</sup>,因此  $s_c$  容易从时间-位移观测曲线上确定,进而定量计算锁固段断裂点对应的临界位移或应变  $s_f$ 。由于沿断层面的深部滑动位移不能直接测量,应寻求位移的替代量,已有研究表明 Benioff 应变可作为深部滑动位移的替代量<sup>[20]</sup>。

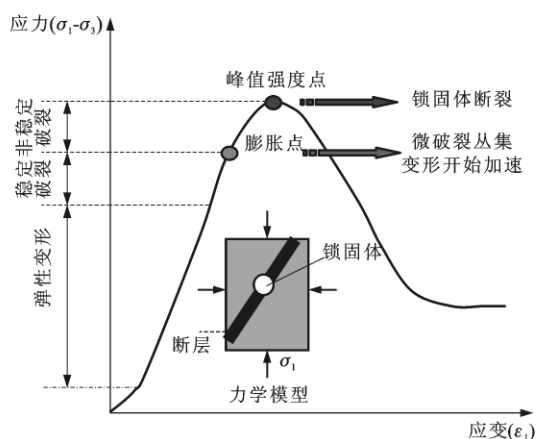


图 1 三轴压缩下单锁固体变形破坏过程

Fig. 1 Sketch Map Illustrating the Deformation and Failure Process of Single Locked Patch in a Fault Under Triaxial Compression

实际上,一个孕震断层可能含多个锁固段。在式(1)的基础上,笔者导出了适用于孕震断层中多锁固段破裂的临界应变表达式

$$s_f(k) = 1.48^k s_c \quad (2)$$

式中: $s_f(k)$  为第  $k$  个锁固段断裂点(即将发生的中等强度预震或大级别预震)的临界应变。在最后一

个锁固段破坏后,主震将发生。式(2)表明,失稳点的临界应变与加速应变始点和锁固段的数目有关,而与锁固段的尺寸和强度无关。

值得注意的是,Benioff应变计算依赖于一个地震周期内完整且准确的地震目录以及对孕震区域的准确识别,故观测和计算误差不可避免。为此笔者提出一种估算 Benioff 应变误差的方法

$$\Delta = \frac{s_f^* - 1.48s_c^*}{0.48} \quad (3)$$

式中: $\Delta$  为应变误差; $s_c^*$  和  $s_f^*$  为加速应变起点和第一个锁固段断裂点对应 Benioff 应变观测值,其具体推导过程详见文献[11]。

利用式(3)可对含多锁固段的孕震断层地震活动性观测数据进行误差改正,以提高预测精度。对世界上典型大地震的回溯性预测验证表明<sup>[13]</sup>,该理论是可靠的,可用于实际地震预测。在此基础上,基于该理论尝试着进行中国范围内未来强震预测研究工作,希望能够给限于困境的地震预测科学注入新的动力。

## 2 强震四要素预测方法与孕震时空区域划分原则

笔者根据相当数量大震实例的分析总结,提出了确定包括大震震级、地点、临界应变(对应发震时间)与震源深度在内的四要素预测方法;给出了孕震周期的时间起点确定原则、孕震空间尺度确定原则、孕震时空范围内能量积累与释放的能量守恒原则与孕震规律合理性检验原则,根据这4项基本原则,并结合断裂分布与地震活动性,可划分合理的孕震时空范围<sup>[14-18,21]</sup>。需要强调的是,对大震震级与震中位置的预测应根据地震活动性监测进行动态修正,以逐渐接近实际情况。

因此,建议按照以下工作步骤确定合理的孕震时空范围:首先基于活动断裂与大于一定震级的地震活动性分布关系、非发震断裂的边界控制条件、地震条带与地震空区空间展布等,初定多种孕震空间范围的不同组合方案;然后根据以上4项基本原则检验孕震空间与时间尺度划分方案的合理性,尽可能用多个历史大震进行多点检验,直至优选出最佳方案。

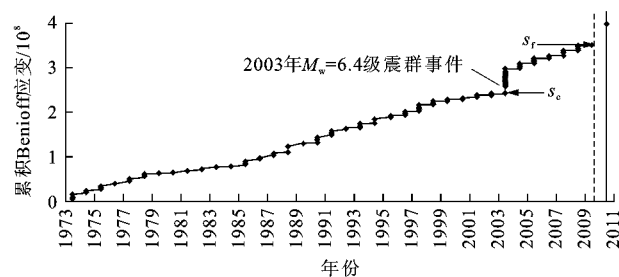
在孕震区确定后,还可根据地震活动性的空间差异性,再细分出地震带,研究各地震带强震的联系,可解释强震链式发震机理。

根据上述4项基本原则,对中国各强震孕震区域进行合理划分,并对未来各地震区的地震四要素进行预测<sup>[17]</sup>,编制“中国地震区划分图”与“中国未

来强震预测图”。对2011年3月云南盈江  $M_s=5.8$  级地震和缅甸  $M_s=7.2$  级地震的超前预测表明,根据笔者提出的孕震断层多锁固段脆性破裂理论和相关方法,可以预测强震四要素(包括震源深度)<sup>[22]</sup>。

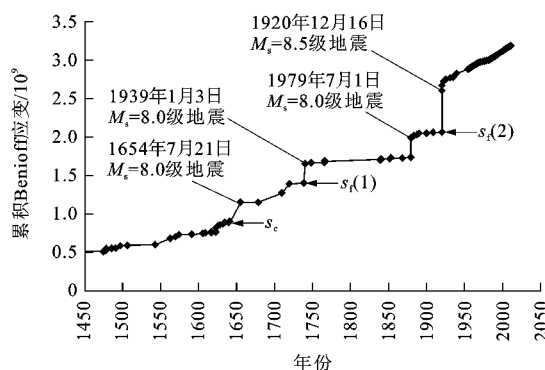
## 3 强震孕育过程的共性规律——加速性地震活动性前兆(震群)

从分析过去105个强震实例看,大震前都有加速性地震活动前兆,即在锁固体变形到膨胀点时,在大震前都有震群发生(图2~7)。该规律是具有普适性的共性规律。



注:垂直实线为主震发生时间,垂直虚线为预测的主震发生时间;  
 $M_w$  为矩震级;据文献[11]。

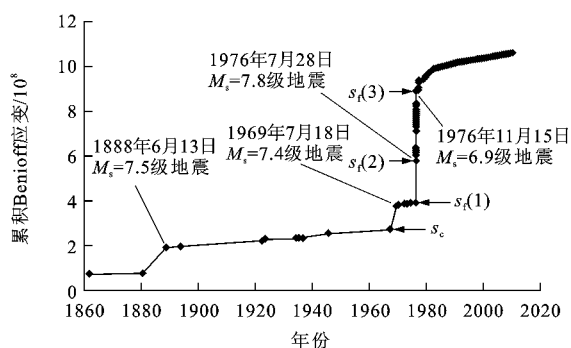
图2 2010年1月12日海地  $M_w=7.0$  级地震前  
累积 Benioff 应变随时间的变化  
Fig. 2 Time Variation of the Observed Cumulative  
Benioff Strain Before the 12 January 2010 Haiti  
 $M_w=7.0$  Earthquake



注: $M_s$  为面波震级;据文献[14]。

图3 海原地震区公元前193年至公元2010年6月  
6日累积 Benioff 应变与时间关系  
Fig. 3 Temporal Distribution of Cumulative Benioff  
Strain in the Period from BC 193 to 6 June 2010  
for the Haiyuan Seismic Zone

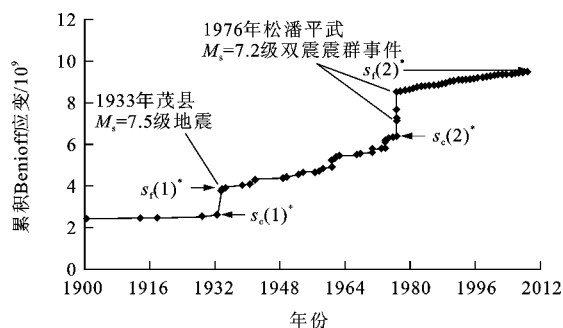
正如 Tang 所指出的,此规律产生的根本原因在于岩石介质的非均匀性<sup>[23]</sup>。对完全均质材料(例如玻璃)的破裂过程,其主震前将没有任何中小地震发生,并且其膨胀点和峰值断裂点重合,对这种材



注: 据文献[15]。

图 4 京津唐地震区(唐山地震)1730 年 9 月 30 日至 2010 年 6 月 6 日累积 Benioff 应变与时间关系

Fig. 4 Temporal Distribution of Cumulative Benioff Strain in the Period from 30 September 1730 to 6 June 2010 for the Beijing-Tianjin-Tangshan Seismic Zone



注: 误差修正已被考虑; 垂直线为  $M_w = 7.9$  级大震发生时间; 据文献[16]。

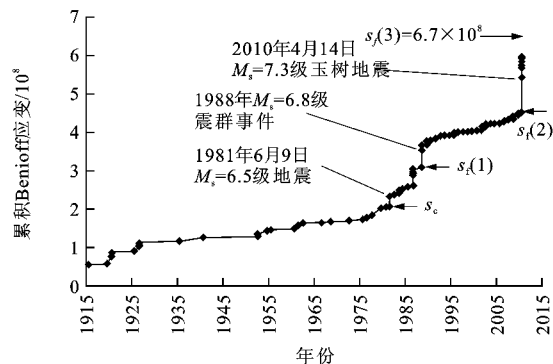
图 5 公元 638 年至 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_w = 7.9$  级地震发生前累积 Benioff 应变与时间关系

Fig. 5 Temporal Distribution of Cumulative Benioff Strain in the Period from 638 to 12 May 2008 Prior to the Wenchuan  $M_w = 7.9$  Earthquake

料的破裂过程因无任何前兆而无法预测。但地壳岩石是非均质的材料, 从室内声发射实验知道, 在岩石变形到膨胀点前有小事件发生; 到达膨胀点时微破裂会向未来的主破裂面丛集, 震群出现; 在强度峰值点附近, 最大的破裂事件(主震)发生。因此可以推断, 没有前震的主震型地震序列是不存在的。

只有从长时间尺度和大范围空间尺度孕震过程的观点出发, 才能正确理解大震孕育演化过程。特定孕震区内的任何破裂都是有联系的, 任何事件都不是孤立的, 都与锁固体在不同变形阶段的破裂过程密切相关, 也即孤立型地震是不存在的。

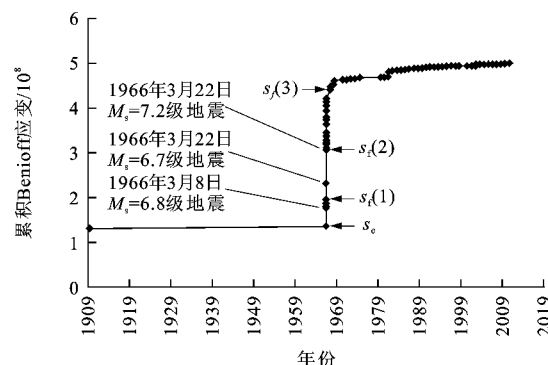
研究表明, 虽然大地震和特大地震的孕震过程千差万别且十分复杂, 但其孕震过程仍遵循着一个基本、确定乃至简单的力学规律, 大地震是可以预测的<sup>[10-11, 13-18, 21-22]</sup>。世界上最有规律、最按“规则出牌”



注: 据文献[14]。

图 6 青海玉树地震区 1738 年至 2010 年 6 月 7 日累积 Benioff 应变与时间关系

Fig. 6 Temporal Distribution of Cumulative Benioff Strain in the Period from 1738 to 7 June 2010 for the Yushu Seismic Zone in Qinghai



注: 据文献[15]。

图 7 邢台地震区公元 777 年至 2010 年 5 月 31 日累积 Benioff 应变与时间关系

Fig. 7 Temporal Distribution of Cumulative Benioff Strain in the Period from 777 to 31 May 2010 for the Xingtai Seismic Zone

的自然现象就是大地震的孕育发展过程, 其孕震过程虽然复杂, 但受常数“1.48”的控制。强震孕育过程遵循着能量守恒原理, 即在特定孕震时空范围内地质体积累的能量应等于最终释放的能量。

#### 4 强震孕震模式

为了解释与地震发生有关的各种前兆信息和解决地震预测问题, 国内外学者已经建立了诸多地震孕育模式, 如弹性回跳模式、扩容模式、裂缝串通模式、组合模式、障碍物与凹凸体模式等<sup>[1-9]</sup>。但是上述模式只能对特定地震孕震过程或前兆作出一定程度的合理解释, 适用范围有限且不具有普适性。鉴于笔者提出的理论对历史强震回溯性检验取得的良好效果, 在此对相应的历史强震实例进行了归纳总

结,提出了4种强震孕震模式。

#### 4.1 大震震级呈“大一小一大”型

该类型强震在孕育过程中,一般先发生一个较大的事件,且该事件对应的锁固段直接从其变形膨胀点破裂到峰值强度点。其后经过一段较长时间后再发生一个稍小一点的事件,且该事件为另一个锁固段在其变形膨胀点处的标志性震群事件,之后再发生更大的事件。汶川  $M_w=7.9$  级地震与唐山  $M_s=7.8$  级地震都属该种类型。

从图5看出,在汶川大震前,存在有两个锁固段,1933年茂县7.5级大震已使第一锁固段破裂完毕,该震为汶川大震能量的蓄积起到了重要作用,但不是汶川大震最直接的起因。之后1976年的松潘平武双震震群事件是第二锁固段的临界破坏始点,即第二锁固段的变形膨胀点,由于其在加速破裂后还未到达峰值强度点,之后必有更大的事件发生。根据上述理论方法,预测的汶川大震震级为7.8级,发震时间为2008年4月11日,为汶川大震前1个月,震中位置在绵竹附近。

简而言之,尽管汶川大震是其孕震区内长期能量积累的结果,但导致其发生的最直接原因是1976年的松潘平武双震事件,该7.2级双震事件是引发汶川大地震的直接导火索。

从图5也可看出,从1976年至2008年汶川大震发生前,地震活动性总体是平静的。从2004年12月开始的紫平铺水库蓄水并没有使孕震区内的地震活动性增强,这说明汶川大地震与紫平铺水库蓄水没有直接的关联。

#### 4.2 大震震级呈连续上升型

利用第一个锁固段在其变形膨胀点处的标志性震群事件,可连续预测到以后的大震,这说明在孕震断层中锁固段按照其强度和尺寸的不同,其锁固段是沿断层一字排列并逐次破裂的。青海玉树  $M_s=7.3$  级地震等都属这种情况。

由图6可知,根据1981年6月9日  $M_s=6.5$  级地震,以加速应变释放起点值为  $s_c$ ,可连续预测到1988年  $M_s=6.8$  级地震和2010年4月14日青海玉树  $M_s=7.3$  级地震在临界失稳点的应变值。但截止到2010年6月7日,  $M_s=7.3$  级地震对应的锁固段还未破裂完毕,以后可能在该地震区还会发生  $M_s=7.6$  级强震事件。为此建议,首先对该地震区内是否还存在闭锁区域(锁固段)进行地震地质调查,并结合未来5年的地震活动性监测,进行综合分析以作出科学判断。

#### 4.3 锁固段快速连续破裂型

锁固段在较短时间内快速连续破裂,邢台1966年  $M_s=7.2$  级地震属这种类型。这种类型地震是笔者分析过的地震实例中唯一的一例,其原因可能是锁固段之间距离较近且脆性程度较高所致。

根据该区的历史地震目录,1966年3月22日邢台  $M_s=7.2$  级地震发生之前,没有震级大于或等于7.0的强震发生。从图7可知,1966年3月6日至8日以  $M_s=6.8$  级地震为标志的震群事件已使第一锁固段破裂完毕,第二锁固段膨胀点的事件是1966年3月22日的  $M_s=6.7$  级地震事件,利用该事件可准确预测到  $M_s=7.2$  级地震,第三锁固段以震群形式破裂,其结束的标志性事件是1967年3月27日的  $M_s=6.3$  级事件( $M_s=7.2$  级事件后最大一次地震)。

比较已分析过的105个大震实例,邢台  $M_s=7.2$  级地震是一个特殊的地震实例。一般在大震前的震群出现后,经历几年乃至几十年或上百年,后续的大震才能发生。邢台大地震与其他大震完全不同,是一个在较短时间内多锁固段连续快速破裂的强震孕育实例,其演化的特殊机制研究值得重视。

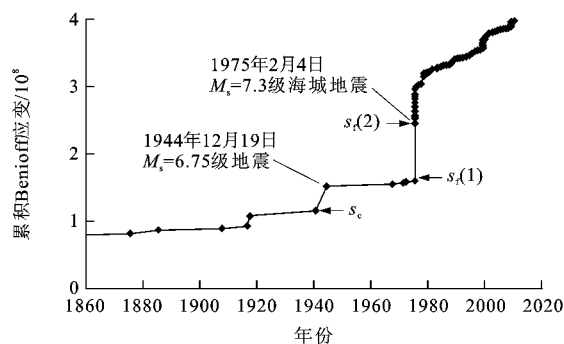
#### 4.4 标准型

利用第一个锁固段在膨胀点处的标志性震群事件可预测到主震在临界失稳点处的应变值,且主震对应的锁固段也破裂完毕(达到峰值强度点)。这种类型的地震最多,海城1975年  $M_s=7.3$  级地震就是典型例子。根据孕震区域范围内 Benioff 应变计算结果(图8),预测的临界应变值为  $1.69 \times 10^8$ ,在临界点处的实际监测值为  $1.58 \times 10^8$ ,相差  $1.1 \times 10^7$ ;预测的震级为7.1级。海城  $M_s=7.3$  级地震已使其对应的锁固段破裂完毕,其后为主震发生后的余震事件,余震结束的标志性事件为发生在1978年5月18日的  $M_s=5.9$  级地震。

从图8可知,发生在1944年12月19日的辽宁丹东  $M_s=6.75$  级地震,是1975年2月4日海城  $M_s=7.3$  级地震对应的锁固段在其膨胀点处的标志性事件。从孕震区内有文献记载的地震活动性来看,海城大地震至少已孕育了1956年,是能量长期累积导致的结果。但导致其发生的最直接原因是1944年的丹东地震事件,该6.75级地震是引发海城大地震的直接导火索。

### 5 结语

(1)发现了强震孕育过程的多锁固段脆性破裂规律,利用加速性地震活动前兆(震群事件)可预测



注:据文献[15]。

图 8 海城地震区公元 19 年至 2010 年 6 月 5 日  
累积 Benioff 应变与时间关系

Fig. 8 Temporal Distribution of Cumulative Benioff  
Strain in the Period from 19 to 5 June 2010  
for the Haicheng Seismic Zone

未来大震,该规律具有普适性;给出了强震四要素预测方法与孕震时空区域划分原则。

(2)根据历史强震的地震目录序列,归纳出了 4 种孕震模式:大震震级呈“大一小一大”型、大震震级呈连续上升型、锁固段快速连续破裂型和标准型。尽管这 4 种模式表现形式各不相同,但都可以用多锁固段脆性破裂理论解释。

(3)对诸多历史强震实例的分析表明,多锁固段脆性破裂强震预测理论与方法适用性良好。当然该理论还有发展完善的必要,笔者也正为此不懈努力。

(4)基于上述研究成果,建议今后抗震减灾研究工作重点应该放在以下方面:①加强活动断裂位置精确定位、性质判定的地震地质研究,用地球物理手段探明隐伏断裂;②开展孕震区锁固段(闭锁区域)判识的地质与地球物理研究;③整理与修订历史地震目录,修正 1970 年以后地震目录的误差;④优化地震台网布局,地震目录中的震级尽可能采用统一震级表达,如采用矩震级,以便于科学研究。

成文中得到刘光鼎、滕吉文、朱日祥院士以及吴福元、常旭研究员的鼓励,得到王思敬院士、张倬元教授的有益指导,在此一并致谢。

#### 参考文献:

[1] 陈运泰. 地震预测要知难而进[J]. 求是, 2008(15): 58-60.  
[2] McCann W R, Nishenko S P, Sykes L R, et al. Seismic Gaps and Plate Tectonics: Seismic Potential for Major Boundaries [J]. Pure and Applied Geophysics, 1979, 117(6): 1082-1147.  
[3] 傅承义. 有关地震预告的几个问题[J]. 科学通报, 1963(3): 30-36.  
[4] Sobolev G A, Chelidze T L, Zavyalov A D, et al. Maps of Expected Earthquakes Based on a Combination of Parameters [J]. Tectonophysics, 1991, 193(4): 255-265.

[5] Rundle J B, Klein W, Tiampo K, et al. Linear Pattern Dynamics in Nonlinear Threshold Systems[J]. Physical Review E, 2000, 61: 2418-2431.  
[6] Keilis-Borok V I, Knopoff L, Rotwain I M, et al. Intermediate-term Prediction of Occurrence Times of Strong Earthquakes [J]. Nature, 1988, 335: 690-694.  
[7] Mignan A, King G C P, Bowman D. A Mathematical Formulation of Accelerating Moment Release Based on the Stress Accumulation Model[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 111(B7): 1-9.  
[8] 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学: D 辑, 2009, 39(12): 1633-1658.  
[9] Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquakes Cannot Be Predicted[J]. Science, 1997, 275: 1616.  
[10] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.  
[11] 秦四清, 徐锡伟, 胡平, 等. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 1001-1014.  
[12] 秦四清, 王媛媛, 马平. 崩滑灾害临界位移演化的指数律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 873-880.  
[13] 秦四清, 薛雷, 王媛媛, 等. 对孕震断层多锁固段脆性破裂理论的进一步验证及有关科学问题的讨论[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 749-758.  
[14] 秦四清, 薛雷, 黄鑫, 等. 青海、甘肃与宁夏地区未来大地震预测分析[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1168-1174.  
[15] 秦四清, 薛雷, 黄鑫, 等. 山东、河北、河南、山西、辽宁海城与京津地区未来中强地震预测[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1539-1549.  
[16] 秦四清, 薛雷, 徐锡伟, 等. 川滇地区未来强震预测与汶川  $M_w 7.9$  级地震孕震过程分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2639-2650.  
[17] 秦四清, 薛雷, 黄鑫, 等. 中国未来强震预测文集[M]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2010.  
[18] 秦四清, 薛雷, 黄鑫, 等. 西藏地区未来强震预测[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(6): 1879-1886.  
[19] Lei X L. How do Asperities Fracture? An Experimental Study of Unbroken Asperities[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213(3/4): 347-359.  
[20] Jaume S C, Sykes L R. Evolving Towards a Critical Point: a Review of Accelerating Seismic Moment/energy Release Prior to Large and Great Earthquakes[J]. Pure and Applied Geophysics, 1999, 155(3/4): 279-305.  
[21] 秦四清, 薛雷, 黄鑫, 等. 新疆与其边境地区、内蒙古地区及华东、华南与台湾部分地区未来强震预测[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 21-31.  
[22] 秦四清, 薛雷. 云南盈江  $M_s 5.8$  级地震和缅甸  $M_s 7.2$  级地震预测总结及震后趋势分析[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 462-468.  
[23] Tang C A. Numerical Simulation of Progressive Rock Failure and Associated Seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 249-261.