

松潘大震震源过程研究

秦保燕 刘江峰 徐纪人 李亚荣

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文应用调制小震法对松潘地震前的震源过程进行了剖析,初步得到震前六年半(直至发震)这一时段内震源区和源外调整单元地震活动的时空图像,其特点如下:

1. 第一阶段(1970—1973.5.7)*在此阶段其地震活动的空间图像主要是形成调制小震带的围空区和空段区,但在震源区仍有非调制小震活动表明,该时段震源区和外围区具有不同的介质强度,背景震源区初步形成。

2. 第二阶段(1973.5.8—1974.12)在此阶段,地震活动的空间图像主要表现为震源区内非调制小震的消失,震源区北端中强震活跃。这说明震源区形成,应力正在加速积累。

3. 第三阶段(1975.1—1976.8.15)在此阶段未来震源区两端出现调制小震带的交汇区。震源区内非调制小震恢复活动。说明震源区两端的应力调整单元已基本形成,震源区应力水平相当高,震源已具备发震条件。

4. 在第四阶段的最后半年震中区以及外围(约 300×200 平方公里)小震调制比出现异常。说明震源区及其邻区应力水平已相当高,这是松潘大震来临的中期指标。

5. 临震前二个月内震源外围出现与外因时间同步的小震频度峰值,分别出现在6月27日、7月13日和8月15日。根据它们的同步性以及异常时间的倍九特征可进行松潘大震的短临预报。

根据松潘震源过程的研究,利用小震在不同阶段的震源过程时空特征,有可能对一次大震作出不同时间尺度的预报。

前 言

震源过程的研究是探索地震成因和地震预报的重要步骤之一,然而,直到目前为止,人们对震源的具体过程仍然只有零星的了解。造成这种情况的原因是可供研究震源区的资料太

*这个阶段可能比较长,但由于小震资料长度的限制,不能取更长时间。

少和资料长度太短。为了改善这种情况,本文研究了1970年以来松潘及其附近的小震,并根据组合模式的观点^[1],利用固体潮对大震震源区和源外区诱发小震的差异,把小震进一步区分为与固体潮相关性好的小震(称之为调制小震)和与固体潮相关性不好的小震(称之为非调制小震),由上述两种小震的空间分布以及它们随时间进程的变化来研究松潘大震的震源过程(简称为调制小震法)。由于1970年后甘川交界地震台网才趋于完善,因此资料长度仅6年多。关于本文应用的固体潮调制小震法曾在文献^[2]中作过较详细介绍,本文不再赘述。

一、松潘大震余震分布及区域压应力方向

据四川省地震局业务处、地震地质队在松潘地震后的总结,松潘大震后的余震($N \geq 3.0$)分布如图1所示^[3]。从这个余震分布图可以看出,在震源区北部余震的长轴走向为北西 30° ,南部转向西南即南西 40° 。余震的南北区长轴方向分别与两次7.2级地震的两个P波节面走向相近(北西 40° 和北东 30°)^{*}。由图1可知,余震区北部—北北西向余震区长轴长约

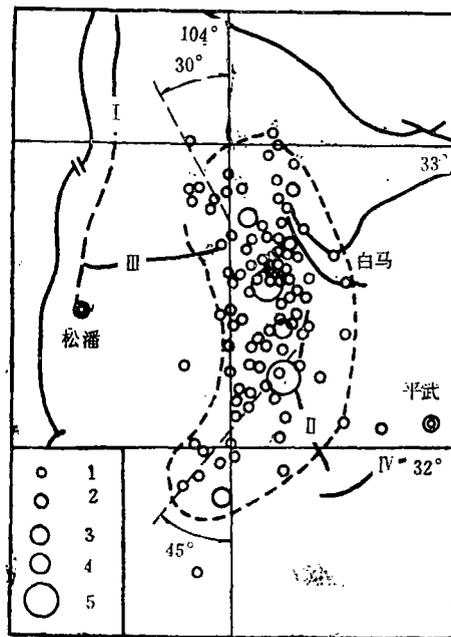


图1 松潘地震余震震中分布图

1. $M=3.0-3.9$ 2. $M=4.0-4.9$ 3. $M=5.0-5.9$ 4. $M=6.0-6.9$ 5. $M \geq 7.2$

Fig. 1 The aftershock distribution of the 1976 Songpan earthquakes.

80公里,南部长约50公里。根据震级与震源体线性长度之间的经验关系式

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

可分别求得相应震级为7.3和6.9。这个计算结果是与实际发生的地震震级相近的。由此可以认为,松潘大震后的余震区分布可初步确定松潘地震震源区的轮廓。

* 秦保燕、徐纪人、翟文杰,南北地震带北段现今地壳应力场讨论,1985。

松潘大震发生之前在图1所示的余震区北端南坪曾发生多次中强地震，即1973年5月8日5.2级地震、8月11日6.5级地震、1974年元月16日5.7级地震、1974年11月17日5.7级地震。这几次地震除5月8日南坪地震未作出震源机制结果外，其它均得到了较好的机制解，加上1976年松潘两次7.2级地震机制解，由此综合判定了该区的区域压力方向是近东西向的。对南坪地区的中强地震，我们选择接近南北向的P波节面为断层面，其断层面的错动旋性与1976年8月16日松潘大震震源断层面的错动旋性一致（图2）。

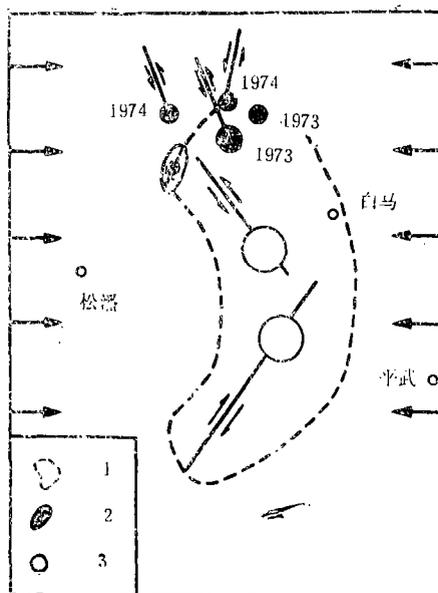


图2 松潘南坪地区中强地震的力源和震源断层面的错动

1. 松潘余震区 2. 1960漳腊营地地震极震区方向 3. 南坪中强震

Fig. 2 Dislocation of fault plane and the force source direction of moderate-strong earthquakes in Songpan-Nanping area.

二、强震前不同时段调制小震的空间分布

根据调制小震方法，我们对松潘大震前不同时段调制小震的空间分布进行了统计。该区台网在1970年以来开始逐步完善，故统计起始时间从1970年开始，统计区为北纬 31° 至 34° ，东经 103° 至 105° ，大约在震中周围三百公里范围内。由于南坪地区大多数小震是几次中强震的余震，故统计时将南坪地区除外。根据我们的统计，松潘大震前调制小震的空间分布图像随时间的变化大致可分为以下三个阶段。

第一阶段（1970年1月1日—1973年5月7日） 这一阶段出现了三个明显的调制小震带，在图3a中分别以I、II、III表示。将这三个带的空间位置与图1中的余震分布区相对比可以看出，调制小震带I位于松潘大震震源区北端附近，走向北东，通过松潘震源区的地方，调制小震活动中断发生。调制小震带II位于松潘大震震源区西南端，走向也为北东。该带与松潘震源区南端相接的部位亦无调制小震发生，且该带的西南段调制小震较东段更为集中。III带呈北西向并与I带相交，因离震源端部有一定距离，此处不予讨论。

由图3a可以看出,松潘大震震源区就位于上述I与II这两个调制小震带之间。在图3中虚线所圈范围内,未出现调制小震的活动,然而非调制小震活动仍比较正常。这说明在此

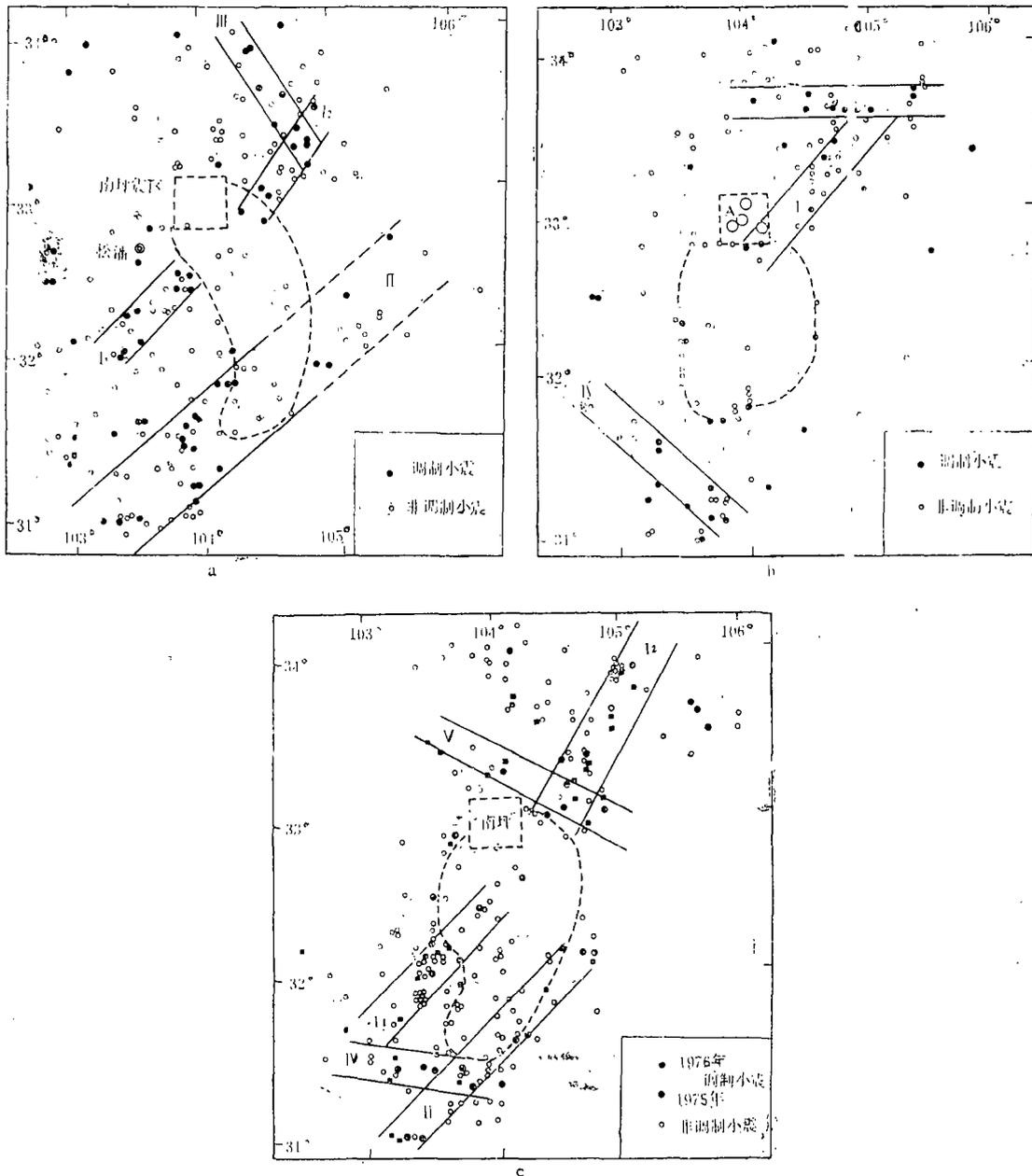


图3 松潘地震前调制小震的空间分布

a. 第一阶段(1970.1.1—1973.5.7) b. 第二阶段(1973.5.8—1974.12.31)
c. 第三阶段(1975.1.1—1976.8.16)

Fig. 3 Space distribution of small earthquakes before the Songpan earthquake.

时段震源外围区调整场已基本形成,已经可以明显地区分震源区和源外区的介质差异。因此在这一阶段,松潘大震的震源区已受到了外围供给的能量。从总的小震空间分布来看,如果

不考虑固体潮这一动力因子，我们就无法利用小震去确定地壳中介质强度相对高和低的地区。因为在地震孕育的初期，小震不仅可以发生在应力积累区，也可以发生在应力调整区。图3所显示的小震空间分布正是说明了这一情况。

第二阶段（1973年5月8日—1974年底）

这一时段是松潘震源区北端中强震活动阶段。共发生四次中强震，且都发生在南坪地区。在统计区的南部，图3b中呈北西向的Ⅳ带在此时段也有较清楚的显示。但总的来说，在此时段松潘震源区南部的调制小震活动比较分散。值得指出的是，在此时段，原有非调制小震活动的松潘大震孕震区内非调制小震活动突然消失，形成明显的非调制小震空区。这一阶段调制小震的空间分布和非调制小震的空区出现表明，松潘震源区开始积累应力，在A区显示了较高的应力集中，并在该区（南坪）发生了多次中强地震。

第三阶段（1975年1月1日—1976年8月16日震前）这是松潘强震活动前的最后一个阶段。在松潘震源区北端和南端均出现了小震调制带的交汇，在其北端除了南坪中强震区的调制小震带继续发生余震外，北东和北西向调制小震带在南坪地区附近交汇。在松潘大震区南端则有北西向和两个北东向调制小震带交汇。在上述二个调制小震带之间原小震空区内，非调制小震在此时段有相当的增加。这一现象说明松潘震源区已处于应力水平相当高的阶段，如图3C所示。

三、松潘强震孕震过程讨论

上述三个阶段大致反映了松潘地震中期孕育过程的时间进程。即第一阶段是震源区和外围区同时有小震活动，但调制小震带发生在外围。此阶段是震源区和源外区同时受力的阶段，但显示了震源区的介质强度要强。第二阶段是震源区出现小震空区，即在松潘大震区不仅没有调制小震活动，而且非调制小震也不活动了。而在震源区北端却发生了四次中强地震。这四次中强震发生时间集中、震中位置集中且震后均有大量余震发生，这表明震源北端应力调整单元的调整运动加强，造成震源区端部应力更加集中，从而供给了震源区剪应变积累的能量。由此可以认为该时段是松潘大震应力加速积累的阶段。其调整单元的位置在图3a、图3b中调制小震带Ⅰ附近。在第三阶段，震源区北端继续在南坪地区附近出现调制小震活动和调制小震带的交汇。震源区南端也出现调制带交汇，可以认为这是南端应力调整单元形成的标志。在图3c中我们用虚线圈出调制小震带交汇区之间的调制小震空区，则此区域即应力积累单元，为未来的震源区。在震前其发震的可能方向一种判断是从南坪中强震区开始至调制小震带Ⅱ的东北端；第二种判断是由南坪东调制小震带交汇区至Ⅰ或Ⅱ调制小震带的东北端。其空段长度为100至110公里不等。由前面的公式（1）可估计相应的震级为7.5至7.6。如果松潘震源区南端的应力调整单元考虑为交汇区，则空段长度约160公里。按前面的公式推算得震级为7.8。实际情况是1976年在松潘地区共发生三次大震，即1976年8月16日7.2级、8月22日6.7级和8月23日7.2级。这三次大震后总的余震分布可以视为这三次大震震源体的总体积反映。我们把余震分布区画到前面的图3c中，则我们可以看到余震区总体走向为北北西向，在其南部逐渐转为西南向。余震区的北端与南坪中强震区和调制小震带Ⅰ、Ⅴ、交汇区相接，而在其南端遇到调制小震Ⅱ之后拐弯向该带方向并终止于Ⅱ、Ⅳ调制小震带交汇区，如图4所示。由上所述，前面由调制小震带交汇区和中强地震作为震源端

部的应力调整单元是合乎实际情况的。此处由空段长度估计的地震强度也大体与三次大震所造成的震源体线性长度相当(约160公里)。

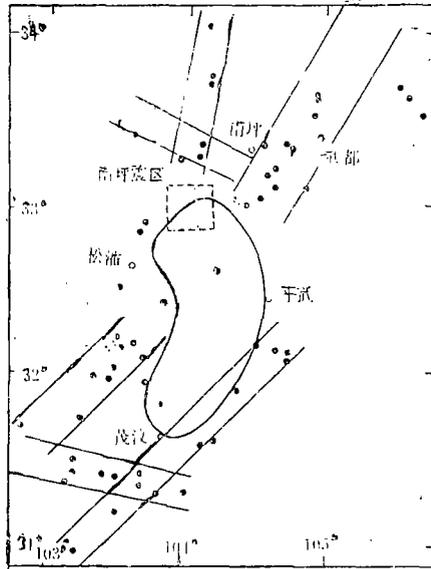


图4 松潘大震前调制小震带分布与余震区相关图(1970—1976.8.15)

Fig. 4 Comparison of the modulated small earthquakes belt distribution before the Songpan earthquake and aftershock area.

四、调制小震频度及调制比随时间的变化

根据调制模式的观点〔4〕,随着愈来愈接近大震发生时间,大震震源区及其外围区不稳定性也将增加。此时,被固体潮调制了的小震数将增加,因之调制小震数与总的小震数之比(调制比)也将增加。这种增加将意味着大震区应力水平较高,不稳定性增强,已临近发生大震了。因此调制小震频度及调制比的增长是衡量大震危险性迫近程度的指标。这些指标是:

1. 调制小震频次随时间的变化 在本文统计区范围内,年调制小震数自1974年开始有明显增加,并在1976年出现加速,如图5a所示。如果按月进行统计,则可以明显地看到调制小震在1976年2月开始有明显的增长(如图5b所示),并在4月达到高值。此后调制小震数略有下降,但仍维持在高值附近。地震当月,调制小震数突然下降。下降的原因一方面可能是统计时段不足一月所引起,但也可能与以往大震前往往出现小震平静有关。由图5b可以看出松潘大震前的调制小震频度增长的时间约在大震前半年。这一时间特征与我国中、强地震前高b值震群活动的时间特征比较一致〔5〕。因此发现调制小震的持续增长,是大地震迫近的中期指标。

2. 小震调制比随时间的变化 在进行调制小震频次统计的过程中,我们发现在临近松潘地震前一年多时段内,调制小震数和非调制小震数几乎同步显著上升,但调制小震频度随时间变化的速率更高(见图5c)。如果我们用调制比(按统计时段计算正常值为0.27左右)作为判断指标,由图6可以看出,在大震前半年,调制比出现了明显的异常。

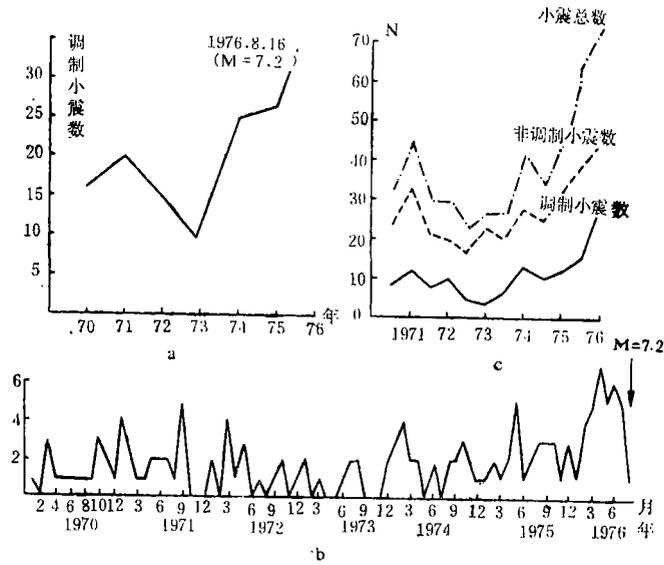


图 5

- a. 松潘地震前调制小震数逐年变化
- b. 松潘地震前调制小震随时间的变化（按月计）
- c. 调制小震、非调制小震随时间变化对比

Fig. 5 a Change of modulated small earthquakes number before the Songpan earthquake (yearly).
 Fig. 5 b Change of modulated small earthquakes with time before the Songpan earthquake (monthly).
 Fig. 5 c Change of modulated small earthquakes number with time contrast with none modulated small earthquakes.

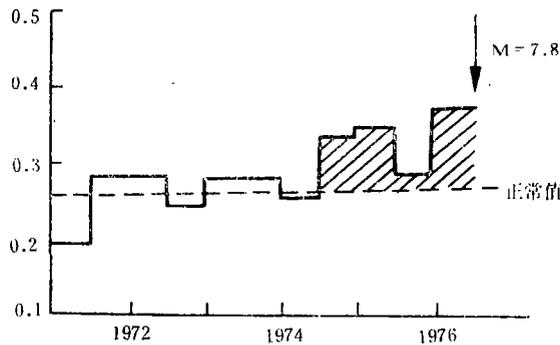


图 6 松潘地震前小震调制比随时间的变化

Fig. 6 The modulated ratio Change of small earthquakes before the Songpan earthquake.

由上述调制小震频度以及调制比随时间的变化可以对松潘强震区以及附近地区的不稳定性作出判断。这种增长表明松潘震源区的应力水平已相当高了，因而可以作为松潘强震发生的中期时间指标。

五、松潘大震短临预报探讨

根据模拟实验结果，在粘滑前常发生稳定滑动，一般称之为予位移^[6]。如果我们能直接或间接地找到预位移的指标，我们就有可能对大震作出短临预报。以前郭增建等同志曾利用外因与前兆的同步性来予测震源地方的不稳定。这种不稳定性有可能是震源断层面上的预位移受到外因调制，也可能是调整单元的调整运动受到外因调制所引起的，当这种运动产生时，就会引起较大范围内相关构造上的小震活动，造成小震频度的突然增加。如果小震的高频次活动与固体潮或其它外因作同步运动，这说明大震即将来临，此时可按下一次外因出现的时间，或用倍九法^[6]粗略地估计发震时间。对于松潘大震来说，我们认为也可能存在这种过程，为此统计了1976年龙陵地震后南北带中段（康定至武威、海原）这一较大范围内小震日频次随时间的变化（图7）。由图7可以看到，平均日频次约为3次左右（±3次），高于8次可作为小震频次异常活动日。在震前2个半月，共出现了三次小震频次高峰，这三次是6月27日（8次），7月13日（10次）以及8月15日（9次）。其中6月27日恰好为初一，即朔日；7月13日为农历十七即为望日。这两个小震高峰值完全与固体潮同步，说明震源过程受到了外因的调制，松潘大震即将发生。最后一个峰值出现在震前一天，这一天没有找到外因指标，是否与地震本身过程有关尚待进一步研究。这三次高频度活动日的地震空间分布如图8所示。由图8可以看出，第一个小震频度峰值其震中主要分布在震源区附近。第二个高峰值和第三个高峰值小震主要在离震源区较远的外围构造带上活动。

这种活动图像显示了松潘大震前小震活动由震源区附近向更外围扩张的特点。这种特点可以理解为：当震源区发生预位移时，其运动首先影响与震源区最近的外围区，并使其内部的小的阻塞段发生地震。当下一次震源再次发生预位移时，震源附近的调整单元已畅通了，力就传到更外围的地区，并使那里

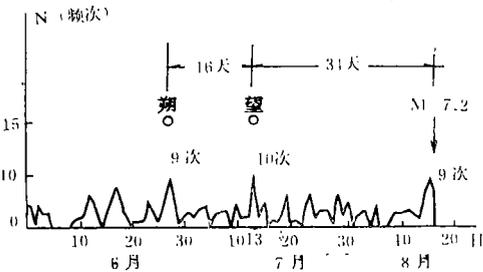


图7 小震频次随时间变化 (M≥1.5)
Fig. 7 Frequency change of small earthquakes with time.

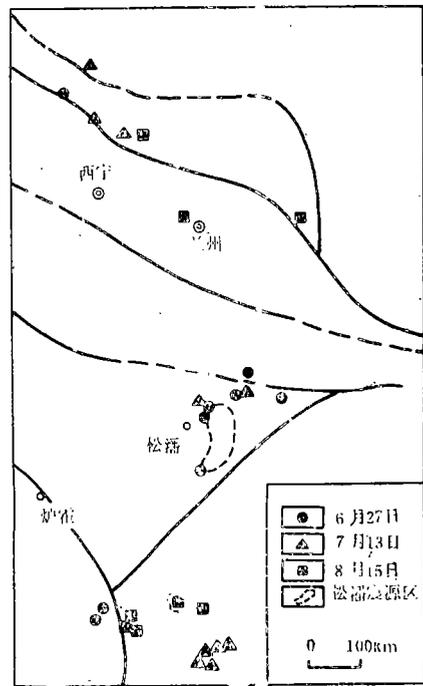


图8 1976年三次高频次地震活动分布图
Fig. 8 Distribution of three times high frequency earthquake activities in 1976.

发生相应地震，从而造成小震活动向外扩展的情况。因此小震由震源区向外围扩展也可以认为是大震来临的信息。

结 束 语

本文使用固体潮调制小震的方法对松潘大震的震源孕育过程进行了研究，並由此探讨了这次大震在不同的孕震阶段震源区和源外区小震活动的时空图像以及中、短、临预报指标。虽然目前使用这一方法讨论大震震源过程的震例还不多，但很显然由调制小震和非调制小震所呈现的松潘大震孕震过程的某些阶段性对我们认识大地震的孕育过程有重要启示。因此利用小震资料以及利用经常作用于地壳的外因（如固体潮、大气压力变化，地球自转的速度突然变化等）经常性地去检查地壳中介质的情况，孕震区应力积累的发展，显然是一件十分有意义的工作。由于小震数量多，有明确的时间和地点，因而它们的异常与正常就能够提供更多的预报信息。此外大震前小震调制带也是划分应力积累单元和应力调整单元的一种实际办法，由此可研究一次具体的强地震其调整单元的具体分布、调整场可能展布到多远，展布的方向如何，从而可预先估计强地震前可能出现的前兆显著带，有目的地布置我们的前兆力量，这对捕捉地震、实现地震预报是有促进作用的。

（本文1985年10月20日收到）

参 考 文 献

- [1] 郭增建等，震源孕育模式的初步讨论，地球物理学报，Vol.15, No. 2, 1973.
- [2] 秦保燕等，西海固地区小震调制特征，西北地震学报(海原5.5级地震专辑),1983.
- [3] 四川省地震局业务技术处、地震地质队，松潘平武7.2级地震地质背景与烈度，四川地震战线，No. 2, 1979.
- [4] 郭增建 秦保燕，短临预报的调制模式，西北地震学报，Vol.2, No. 1, 1980.
- [5] 秦保燕等，大震前震源外围区高b值震群产生的一种物理机制，地震，No. 6, 1983.
- [6] J·H·Dieterich, Geological Survey Research, 1976.

STUDY ON THE SOURCE PROCESS OF THE SONGPAN GREAT EARTHQUAKE

Qin Baoyan Liu Jiangfeng Xu Jiren Li Yarong

(The Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau)

Abstract

Based on the viewpoint that there must be adjustment elements of stress at the ends of earthquake source region and medium of the source region is stronger than that in the neighbour. This paper, by means of the

modulated small earthquake method, analyses the source process of the Songpan earthquake ($M=7.2$). The temporal-spatial pattern of small earthquakes indicates that the source process has three stages.

1. The first-stage (1970---May 7, 1973)

In this stage, a gap appeared in the seismic pattern by the modulated small earthquakes, but no modulated small earthquakes still took place in the gap. It indicates that the homogeneity and the strength of source region are greater than those in its outside part. The background of source region is formed in this stage.

2. The second stage (May 8, 1973---Dec. 1974)

During this time, in the seismic pattern, non-modulated small earthquakes disappear in the source region, but more active for strong and moderate earthquakes in the northern end of the source, which shows that the hypocentral area has been formed and stress is being accumulated.

3. The third stage (Jan. 1975---Aug. 15, 1976)

In this stage, the junction regions of the modulated small earthquake belts are formed at the ends of the Songpan source region. The non-modulated small earthquakes began to be active again in the source, which shows that the adjustment elements at the ends of the source have been formed. In this time, the source region has provided the conditions for the occurrence of earthquakes.

4. During a few months (about half a year) before the 1976 Songpan earthquake, in the epicentral area and its periphery (about 300×200 sq. km), there appeared an anomalous ratio of modulated small earthquakes, which means that there is a very high stress in the source and its periphery. By this we can judge the strong earthquake is coming.

5. There appeared peaks of small earthquakes on June 27, July 13 and Aug. 15 in a large scale of the middle part of North-South earthquake belt before this earthquake, the first two of which are synchronized with solid tide, the last of which happened on the day before earthquake. Such a synchronization means that a large earthquake is impending to occur.