

由地震图上的终止相研究1976年松潘续发性 大震的震源破裂过程*

秦保燕 姚兰予 汪进 李亚荣

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

利用WWSSN长周期远场P波的初相、破出相和终止相研究了1976年8月16日、22日和23日松潘三次大震的震源断层面破裂错动传播的全过程,判定了发震断层面和确定了它们的震源动力学参数。由较弱的P波初相求得三次大震的始破裂区长度分别为8、5和6 km。它们均为双侧破裂,震源体的破裂长度分别为73、43和52 km。由于震源区存在重叠现象,因此,总的震源尺度仅为90 km。由破出相确定8月16日松潘大震的震源深度为9 km。此外,研究还发现,显著的终止相和较大的破裂速度与震源端部存在调整单元有关。

前 言

1976年8月16日至23日在四川省松潘—平武地区连续发生了三次大震。这三次地震的震中集中分布在北北西走向长约60 km的虎牙断裂带上。根据国内地震台网测定,这三次地震的震级分别为7.2、6.7和7.2。很显然其震源区的累计尺度要比虎牙断裂长得多。如果是虎牙断裂作为唯一的发震构造,那么这三次地震的震源是如何在此发震构造上容纳的,它们的震源体之间是怎样衔接的?如果还有其它发震构造参与,那么究竟是那一个具体构造,这三个震源体又是怎样衔接的?对上述问题进行研究有利于了解续发大震型地震的发震机制。1985年和1986年周蕙兰等^[1、2]曾用理论地震图对松潘—平武续发大震进行过研究,并讨论了它们的破裂机制。本文则试图用地震图上的终止相对松潘—平武多次大震的震源破裂过程进行讨论。

一、松潘续发性大震概述

当已知某一次地震的震级和P波初动解后,我们就可以利用终止相进一步去研究震源的

破裂过程,并确定有关的震源动力学参数。对于松潘三次大震来说,震级和P波初动解尚需进一步核准。

1. 震源参数

由我国地震台网测定的松潘三次大震的震源参数如表1所示。为对比起见,将国际台网测定的参数也一并列入。

表1 松潘大震群震源参数

| 日期 | 震中位置 | | Ms | H(km) | 附注 |
|------------|--------|---------|--------|--------|---------------------------------|
| | 北纬 | 东经 | | | |
| 1976年8月16日 | 32°42' | 104°06' | 7.2 | 15 | 中国 MOS(35个台站) NEIS ISC |
| | 32°.6 | 104°.3 | 7.1 | 20 | |
| | 32°.8 | 104°.2 | 6.9 | 16 | |
| | 32°.78 | 104°.09 | 7.1 | 9±10 | |
| 1976年8月22日 | 32°36' | 104°08' | 6.7 | 10 | 中国 MOS NEIS ISC(80个台) |
| | 32°.6 | 104°.4 | 6.7 | | |
| | 32°.6 | 104°.2 | 6.4 | 33 | |
| | 32°.59 | 104°.24 | Mb=6.0 | 15±13 | |
| 1976年8月23日 | 32°30' | 104°08' | 7.2 | 22 | 中国 MOS(35个台) NEIS ISC |
| | 32°.4 | 104°.3 | 6.8 | | |
| | 32°.5 | 104°.2 | 6.7 | 33 | |
| | 32°.49 | 104°.18 | Mb=6.2 | 17±8.1 | |

根据表1可知,中国地震台网与国际地震台网所测定的震中位置有一定偏差,如图1所示。从国际地震台网测定的震中位置来看,1976年8月23日松潘地震的震中明显地向西南方向拐折。而按照中国台网测定的震中位置,松潘三次大震基本上位于虎牙断裂带上(偏向于虎牙断裂带西侧),如图2所示。此外,国内台网与国际台网测定的震级也有偏差,特别是第三次大震,国内台网测定的震级为7.2,而国际台网测定的震级仅为6.7~6.8。

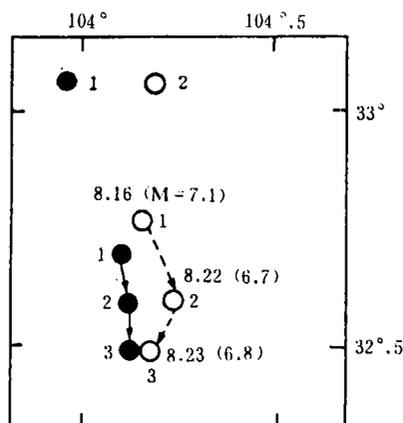


图1 1976年松潘大震群震中分布

1. 中国台网测定震中 2. 国际台网测定震中

Fig. 1 Epicentral distribution of the great Songpan earthquake swarm in 1976

根据国家地震局兰州地震研究所文县强震台(震中距约50km)的加速度记录来看,1976年8月22日和23日两次地震的加速度记录幅值相近,它们均比8月16日地震要小^[3]。因此我们认为松潘三次大震的震级分别为7.2、6.7和6.8较符合实际。这三次大震的震源深度分别为15、10和22km。根据周蕙兰等人的研究(用理论地震图与实际地震图拟合),三次大震的震源深度分别为15、10和10km。而国际台网测得的三次大震的震源深度分别为9、15和17km。

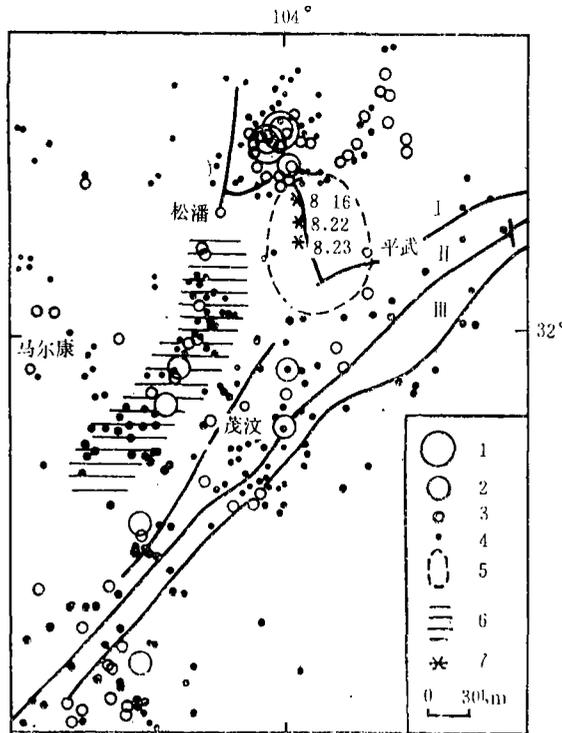


图2 虎牙断裂带及其附近地区震中分布图(1973年—1976年7月)

1. $1.5.0 \leq M < 6.0$ 2. $2.4.0 \leq M < 5.0$ 3. $3.3.0 \leq M < 4.0$ 4. $4.2.0 \leq M < 3.0$ 5. 圈空区

6. 弱震活动条带 7. 1976年松潘强震群

Fig. 2 Epicentral distribution in the Huya fault and its vicinity (1973-1976.7)

2. 震源机制结果

对于松潘大震震源机制，有不少人处理过，他们的结果不尽一致。经过对比，我们认为文献[4]给出的结果矛盾符号比例最小，因此震源机制以此为准。三次大震的P波初动解如表2所示，其吴尔夫网投影如图3所示。

表2 松潘大震群的P波初动解

| 日期 | 震中 ϕ_N λ_E | 地点 | M | h km | 节面A | | | 节面B | | |
|------------|-------------------------------|-------|-------|---------|--------|-----|--------|------|------|-------|
| | | | | | 走向 | 倾向 | 倾角 | 走向 | 倾向 | 倾角 |
| 1976年8月16日 | 32°42' 104°06' | 松潘、平武 | 7.2 | 15 | 147°.5 | NE | 45° | 175° | SWW | 48°.6 |
| 8月22日 | 32°36' 104°08' | 松潘、平武 | 6.7 | 10 | 148° | NE | 58° | 58° | | 90° |
| 8月23日 | 32°30' 104°08' | 松潘、平武 | 7.2 | 22 | 174° | W | 58° | 215° | SE | 40° |
| 日期 | X轴 | | Y轴 | | P轴 | | T轴 | | N轴 | |
| | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 |
| 1976年8月16日 | 265° | 41°.5 | 57°.5 | 45° | 71°.5 | 3° | 336°.5 | 76° | 162° | 14° |
| 8月22日 | 148° | 0 | 58° | 32° | 107° | 22° | 8° | 22° | 238° | 58° |
| 8月23日 | 125° | 50° | 264° | 32° | 101°.5 | 95° | 214° | 67° | 8° | 21° |

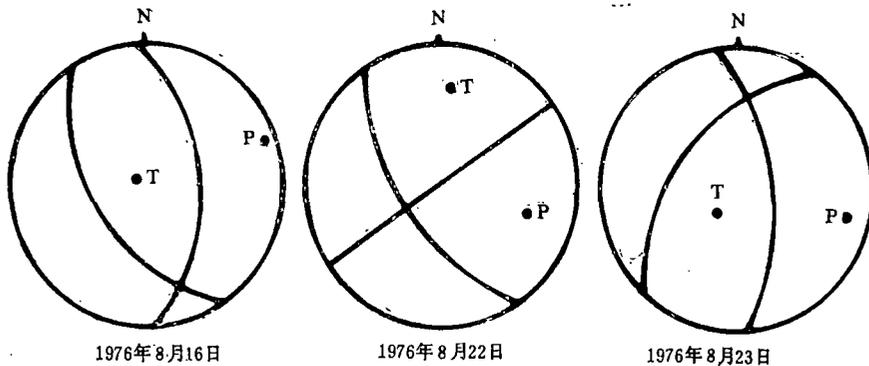


图3 松潘地震P波初动解

Fig. 3 The initial motion solution of P wave of the great Songpan earthquake swarm in 1976

二、1976年8月16日松潘7.2级地震的震源破裂过程研究

关于用终止相研究震源破裂过程的理论讨论和某些地震实例已在文献〔5〕中有专门论述，本文不再赘述。在这里仅着重强调终止相和震源端部调整单元的密切关系。即调整单元的刚度条件愈差，让位愈充分，则震源破裂传至其端部产生的终止相愈明显。此外对于浅源地震，特别是倾滑断层，其破裂传播达及自由面时将产生显著的破出相。1976年8月16日松潘7.2级地震是续发性大震中的第一次大震，其震源区的西北端有南坪中强震区，该区可视为松潘大震西北端的应力调整单元。然而在其东南端却没有调整单元，这将导致震源破裂达及西北端时有较大的终止相，而在东南端则终止相不显著。此外根据文献〔4〕的P波初动解，这次地震的发震断层为一倾滑型逆断层，因此可能有显著的破出相出现。由此震相可研究这次地震的震源深度。

1. 远场P波资料和分析

我们从世界台网的远场P波资料中选择了一部分记录比较清晰的地震图，共计10个台站。这些台站的P波段记录示于图4。

在图4中首先可以看到一个很弱的P波相 P_0 ，这一P波初相我们认为是在8月16日松潘大震始破裂区作有限破裂产生的。由于始破裂区很小，且其两端没有调整单元，因此其位错的释放十分有限，因而其振幅特别小〔1〕。这种情况在唐山地震的远场P波中也曾发现。在初相的后面有一最大的P波振幅出现。由于此震相特别显著，我们称其为破出相，即断层破裂达及自由面时出现的震相。后面出现的两个波峰要小于前面的破出相 P_B ，我们以 P_1 和 P_2 分别表示断层破裂传播至震源两个端部的终止相。在这里终止相的到时我们选择振幅达到最大然后突然下降的这一时刻，其最大波峰的位移方向应与初动方向相一致〔6〕。事实上，有些地震仪还能记到震源断层破裂传播与调整单元相遇时刻出现的相遇震相，在地震图上表现为突然的转折，然后振幅加大（这是由调整单元的让位条件决定的），但有时当转折不明显时往往记不到。所以终止相的到时我们一般取最大峰值处。

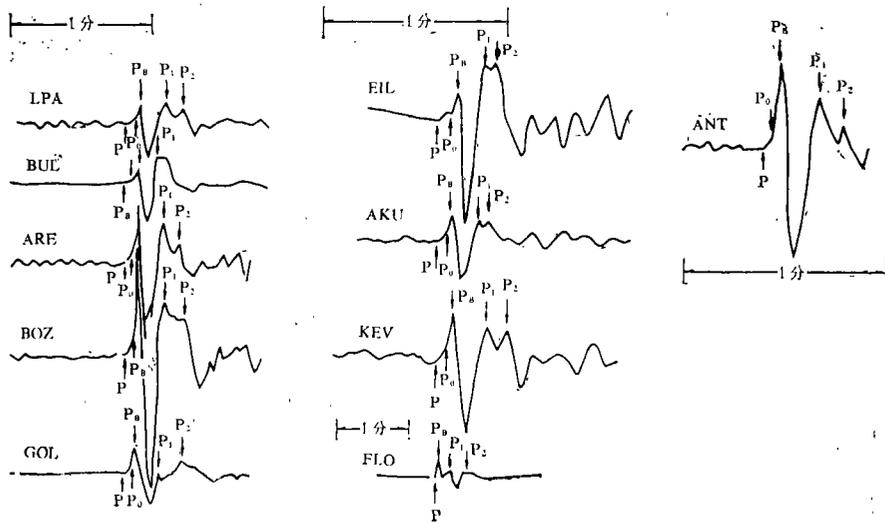


图 4 1976年 8 月16日地震的远台 (WWSSN) P波记录

P₀—初相, P_B—破出相, P₁、P₂—终止相

Fig. 4 The far-field P wave record of the earthquake on August 16, 1976

2. 动力学参数的确定

(1) 始破裂区

根据远场P波的P₀初相与初动P波的到时差 ΔT_{P_0} 以及射线与错动力 X_A 和 X_B 之间的夹角 ψ , 我们可画出它们之间的相关图 (图 5)。由图可见, 始破裂过程在各台引起的时差与错动力 X_A 有关。破裂过程引起各台时差与 $\cos\psi_A$ 的直线方程为:

$$\Delta T_{P_0} = 2.31 - 1.33 \cos\psi_A ;$$

$$L_0 = 7.95 \text{ km} ;$$

$$V^* = 3.4 \text{ km/s} .$$

相关系数 $r = 0.85$, 破裂方向指向西。

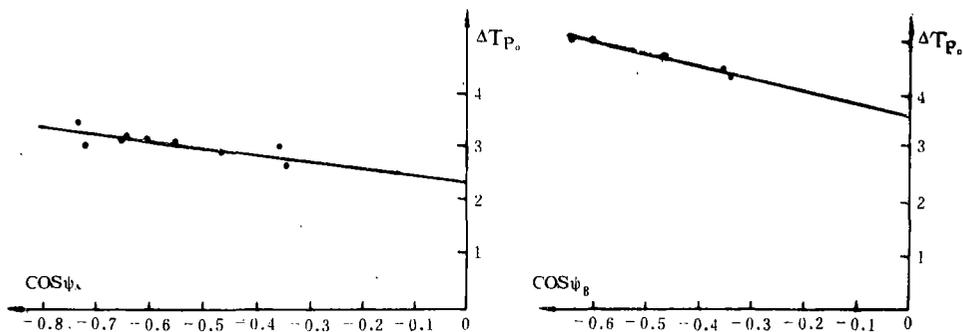


图 5 始破裂区破裂过程时差 ΔT_{P_0} 与 $\cos\psi_A$ 及 $\cos\psi_B$ 相关图

Fig. 5 Relative curves of breaking process time difference (Δt_{p_0}) of initial breaking area and $\cos\psi_A, \cos\psi_B$

(2) 由破出相求震源深度

图4中的P_B是这次地震的最突出事件,在地震图上表现十分显著。根据 ΔT_{PB} 以及射线与X_A的余弦,我们可得 ΔT_{PB} 与 $\cos\psi_A$ 的相关图(图5)。求得向自由面破裂的各台时差与 $\cos\psi_A$ 的直线方程为:

$$\Delta T_{PB} = 3.63 - 2.29\cos\psi_A ;$$

$$L_B = 13.71\text{km} ;$$

$$U^* = 3.77\text{km/s} .$$

相关系数 $r=0.99$ 。破裂方向指向X_A方向。

由沿X_A方向的破裂长度L_B以及断层面上错动力方向与水平面的夹角(41°.5)可推求震源深度

$$H = 13.71 \times \sin 41^\circ.5 = 9.08 (\text{km}) .$$

所求得的震源深度与ISC结果(9km)一致,比中国台网测定的震源深度偏小。

(3) 由P₁和P₂终止相确定震源破裂长度

由于这次地震是一次典型的倾滑型地震,因此除了向倾向方向破裂外,还应在走向方向发生破裂。因此我们以断层面的走向方位和P波射线之间的夹角余弦来研究震源的破裂过程。

图6为双侧破裂的 ΔT_{P_1} 和 ΔT_{P_2} 与 $\cos\psi_A$ 的相关图。其直线方程分别表示为:

$$\Delta T_{P_1} = 15.41 + 7.01\cos\psi_A ;$$

$$L_1 = 42.06\text{km} ;$$

$$V_1^* = 2.73\text{km/s} .$$

相关系数 $r=0.8$ 。破裂方向为北北西方向。

$$\Delta T_{P_2} = 23.35 - 5.19\cos\psi_A ;$$

$$L_2 = 31.11\text{km} ;$$

$$V_2^* = 1.33\text{km/s} .$$

相关系数 $r=0.8$ 。破裂方向为南南东向。

根据以上的计算,此次地震沿断层面走向方向破裂错动的总长度

$$L = L_1 + L_2 = 42.06\text{km} + 31.11\text{km} = 73.17\text{km} .$$

按郭增建、秦保燕在1965年得到的震级M与震源体线性长度L之间的经验关系式

$$M = 3.3 + 2.11 \log L (\text{km}) , \quad (1)$$

可得震级恰好为7.2级。为清楚起见,我们将求得的震源动力学参数汇总于表3中。由表3可知,8月16日松潘7.2级地震为双侧破裂。根据国际地震台网所确定的震中,以及由终止相得到的双侧破裂长度,西北支断层破裂错动的终止点恰好位于南坪中强震区边缘附近,东南支基本上位于1986年8月22日松潘第二次6.7级大震震中附近,如图7所示。

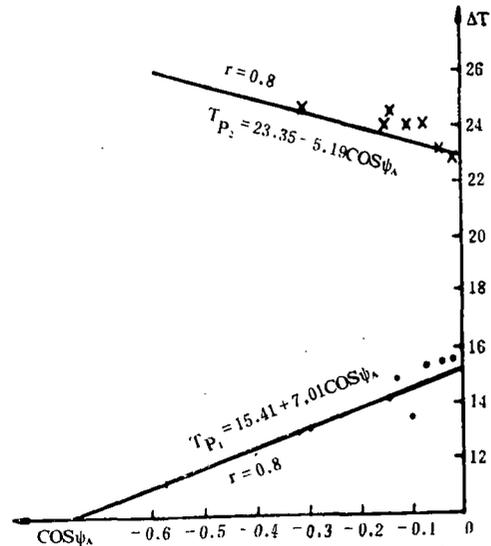


图6 ΔT_{P_1} 、 ΔT_{P_2} 与 $\cos\psi_A$ 的相关曲线
Fig.6 Relative curves of ΔT_{P_1} , ΔT_{P_2} and $\cos\psi_A$

表 3

1976年8月16日松潘7.2地震的震源动力学参数

| | L ₀ | L _B | L ₁ | L ₂ | L ₁ +L ₂ | H | 备 注 |
|-----------|------------------|------------------|----------------|----------------|--------------------------------|------|----------------|
| 破裂长度 (km) | 7.95 | 13.71 | 42.06 | 31.11 | 73.17 | 9.08 | 该震为不对称 双侧破裂 |
| 破裂速度 (km) | 3.4 | 3.77 | 2.73 | 1.33 | 2.03 | | |
| 破裂方向 | X _A 轴 | X _A 轴 | 北北西 | 南南东 | | | |

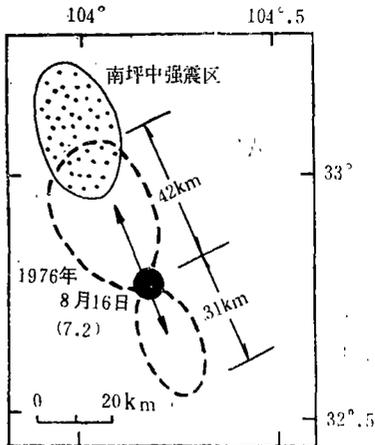


图 7 1976年8月16日松潘地震双侧破裂
Fig. 7 Double direction breaking sketch of
earthquake fault of the Songpan
earthquake on August 16, 1976

三、1976年8月22日松潘6.7级地震的震源破裂过程

此次地震是松潘大震群中第二次地震。其P波初动解表明，这次地震是以平推为主的，特别是北32°西的P波节面，虽有一定倾角，但错动力轴完全在水平面内。由于断层面的破裂错动以平推为主，因此破出相不显著。此外当这次地震发生时震源体北端的调整单元为1986年8月16日松潘7.2级大震区，但其南端缺少调整单元。因此可估计，震源断层北端的终止相要比断层破裂传播至南端时显著。下面对这次地震的震源破裂过程作详细研究。

1. 远场P波资料及分析

我们从世界地震台网的远场P波资料中选择了11个记录比较清晰的地震图，这些P波记录展示在图8中。根据P波记录，我们共判断了4个震相，以它们先后出现的顺序将其命名为P₀、P₁、P₂、P_E。

根据图8列举的资料，P波中的第一个震相为P₀，该震相比8月16日大震的P波初相要显著，因此该震相除了认为是始破裂区产生的初始振动外，还可能是破出相。P₁和P₂震相的到时比较近，但可以明显看出。关于P_E，我们认为可能是结束震相，此震相出现后，P波周期明显变大，且很快回到平衡位置。

2. 震源动力学参数确定

(1) 始破裂区

如前所述，8月22日P波记录中的初相尽管比P₁和P₂小，但确是比较明显的。因此曾怀

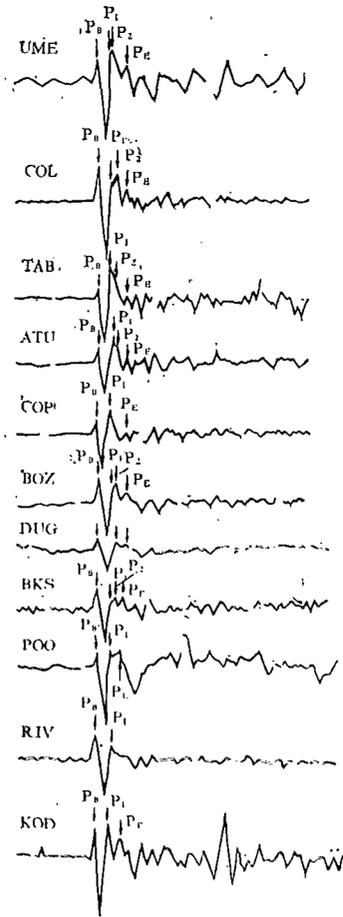


图8 1976年8月22日松潘6.7级地震远场P波记录

Fig. 8 The far-field P wave record of the Songpan earthquake (M=6.7) on August 22, 1976

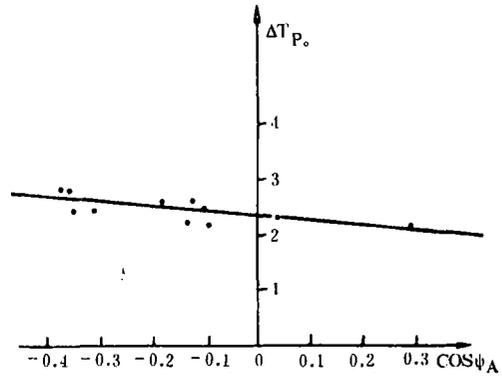


图9 ΔT_{P_0} 与 $\cos\psi_A$ 相关图
Fig. 9 Relative curve of ΔT_{P_0} and $\cos\psi_A$

疑该震相是破出相。由于该震以平推错动为主，因此破出相的走时应与断层在倾向方向的传播过程有关。但按此分析的结果不理想。为此我们按破裂方向为148走向（ X_A 轴，倾角 0° ）进行分析，得到 ΔT_{P_0} 与 $\cos\psi_A$ 的相关图（图9），其直线方程以及有关动力学参数为：

$$\begin{aligned} \Delta T_{P_0} &= 2.36 - 0.85\cos\psi_A ; \\ L_0 &= 5.08\text{km} ; \\ V^* &= 2.15\text{km/s} . \end{aligned}$$

相关系数 $r = -0.76$ 。破裂方向为南南东向。

由于破裂沿水平方向，因此 P_0 相不是破出相。

(2) 由终止相 P_1 、 P_2 以及结束震相 P_E 确定震源参数

为了节省篇幅，我们将终止相 P_1 、 P_2 以及 P_E 与 $\cos\psi_A$ 的相关图表示在图10中。由图10可以看到， ΔT_{P_1} 、 ΔT_{P_2} 和 ΔT_{P_E} 均与 $\cos\psi_A$ 分别成线性相关。其直线方程和有关参数列于表4中。我们对另一断层面的错动力轴 y 轴也作过试算，试算表明相关性不好，这里不再列出。

表4 ΔT_{P_1} 、 ΔT_{P_2} 和 ΔT_{P_E} 与 $\cos\psi_A$ 的相关直线方程与求得的相关动力学参数

| 震相 | 直线方程 | r | L (km) | V* km/秒 | 破裂方向 |
|-----------|--------------------------------|------|--------|---------|------|
| P_1 终止相 | $T_1 = 11.72 + 3.96\cos\psi_A$ | 0.95 | 23.74 | 2.03 | 北北西 |
| P_2 终止相 | $T_2 = 12.79 - 3.31\cos\psi_A$ | 0.87 | 19.88 | 1.55 | 南南东 |
| P_E 结束相 | $T_E = 17.48 - 6.96\cos\psi_A$ | 0.94 | 41.75 | 2.39 | 南南东 |

大震的震源破裂过程

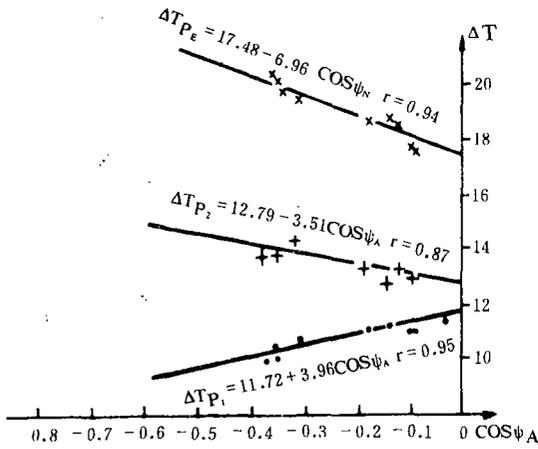


图10 ΔT_{P_1} 、 ΔT_{P_2} 、 ΔT_{P_E} 与 $\cos\psi_A$ 的相关图

Fig.10 Relative curves of ΔT_{P_1} , ΔT_{P_2} , ΔT_{P_E} and $\cos\psi_A$

此外，这次地震的震中恰好位于8月16日大震东南支破裂的终端。然而这次地震为双侧破裂，因此，其向西北方向的破裂错动段将与8月16日地震的向东南破裂错动的断层段相重合。由于这两次地震的震源断面走向和倾向方向均比较一致，因此震源断面基本重合的条件是具备的。这种震源体破裂错动部分重合的原因，初步认为是8月16日松潘大震震源区东南端缺少调整单元，致使能量释放不足造成的。这样当第二次大震发生时，就造成了第一次大震的东南支断层（部分）继续释放能量的条件，並造成两次大震震源体的部分重合。其震源体的重合情况如图11所示。

表 4 所列的震源动力学参数表明，8月22日松潘 6.7 级地震亦为双侧破裂，其总体破裂长度为43.62km，按（1）式可求得相应震级为 6.74。值得指出的是，由 P_E 结束震相求得的震源破裂长度与上述由终止相求得的双侧破裂长度之和相接近。我们初步认为，这可能是因为这次地震双侧破裂的长度相近，当破裂到达震源区端部时，震源断面有一整体的运动。这一整体运动应与整个断层面的长度有关。但从 T_E 直线方程来看，似乎这一整体运动仍是以某种有限速度传播方式进行的。关于这一点还有待于今后积累更多的资料进行讨论。从图10可见，在 P_E 结束相后，P 波的周期明显增大，振幅基本上恢复到平衡位置。

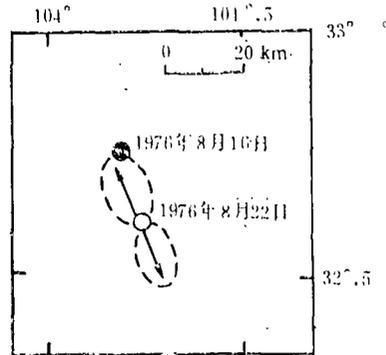


图11 1976年8月22日松潘地震双侧破裂
Fig. 11 Double direction breaking sketch of earthquake fault of the Songpan earthquake on August 22, 1976

四、1976年8月23日松潘7.2级地震的震源破裂过程

根据文献[2]中列举的余震资料，这次大震的破裂方向有可能是拐向南西方向的。但根据文献[3]所列举的余震资料，此次地震则可能是近南北向的。造成余震图像差异的原因可能是选取的余震时间段不同造成的。但究竟那一个是真正的断面还需要作进一步判定。综合分析前两次大震的总的震源尺度，其震源的北端位于南坪中强震区附近，而其南端已接近甚至达及北东东向的平武断裂带。因此第三次松潘大震有可能拐向南西方向，从图2中所显示的地震活动图像来看，该地段恰好为北北东向龙门山地震活动构造和北东东平武构造之间

的地震活动空段。然而周蕙兰等人用理论地震图拟合得到第三次大震震源断层为南北向，这样其震源体将穿过北东东向的平武断裂带并终止于与平武断裂带相平行的龙门山断裂带上。究竟那一个是这次大震的实际断层，看来有争议，下面我们用终止相对这次大震的震源断层作出判定并给出有关的震源动力学参数。

1. 远场P波资料和分析

对这次地震，我们共收集了11个远台P波资料，如图12所示。由图可见，P波段的最大振幅为 P_0 初相以及后面的两个波峰，我们分别视其为终止相 P_1 和 P_2 。

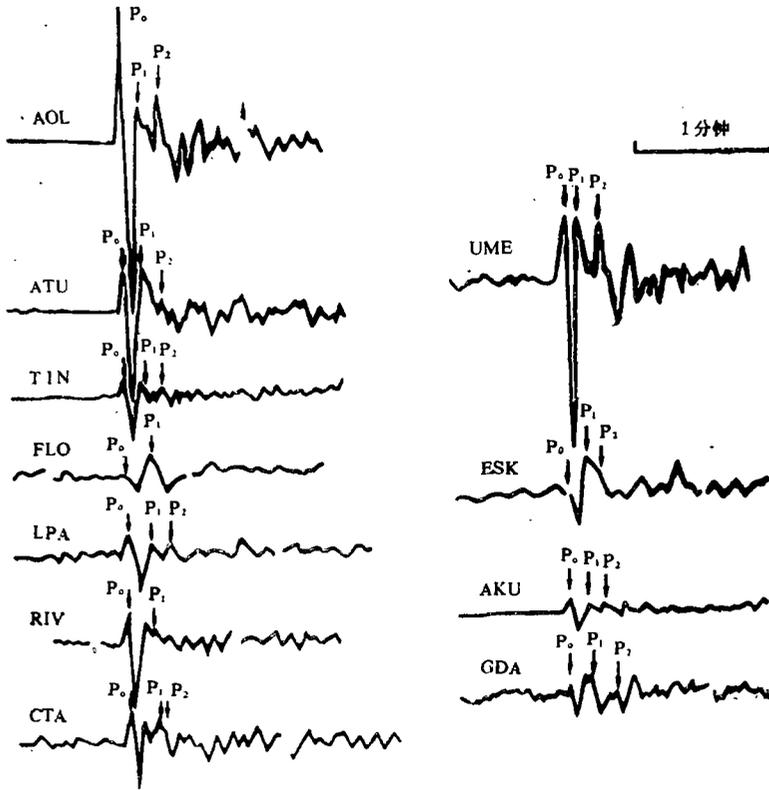


图12 1976年8月23日松潘7.2级地震远场P波记录
 Fig.12 The far-field P wave record of the Songpan earthquake (M=7.2) on August 23, 1976

2. P_0 初相与始破裂区

这次地震是一次倾滑型地震，如果震源深度浅，则应有较显著的破出相。从图12所示的P波记录来看， P_0 初相比终止相 P_1 和 P_2 都大，似乎该震相应为破出相。但从国内外地震资料所确定的震源深度较深来看，此震相的半周期较小，因此也可能是始破裂区出现的震相，初步认为该震相为始破裂相。不管是破出相 P_B 还是始破裂区震相 P_0 ，它们都应与断层面A的错动力轴 X_A 或断层面B的错动力轴 Y_B 作为断层面倾向方向的破裂方向有关。图13为 ΔT_{P_0} 与 $\cos\psi_A$ 和 $\cos\psi_B$ 。相关图。由图可见， ΔT_{P_0} 与X轴和Y轴的相关性均较好，其直线方程和有关参数如下：

$$X轴: \Delta T_0 = 2.01 - 0.96\cos\psi_x ;$$

$$l_0 = 5.8\text{km}; r = -0.9; v^* = 2.9\text{km/s} \text{。}$$

$$Y \text{轴: } \Delta T_0 = 3.3 + 1.07 \cos \psi_y \text{ ;}$$

$$l_0 = 6.4\text{km}; r = 0.9; v^* = 1.9\text{km/s} \text{。}$$

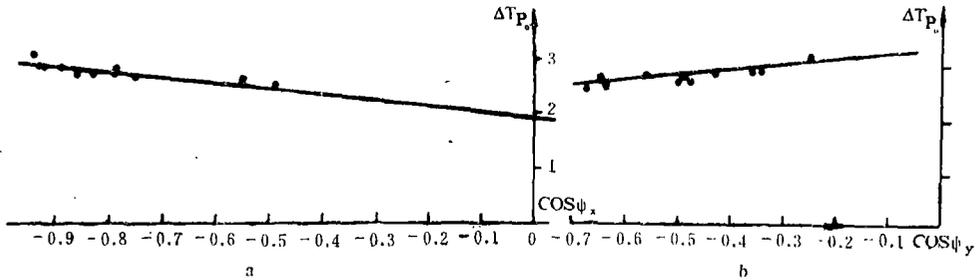


图13 ΔT_{P_0} 与 $\cos \psi_x$ 及 $\cos \psi_y$ 相关图

Fig.13 Relative curves of ΔT_{P_0} and $\cos \psi_x, \cos \psi_y$

由于 ΔT_{P_0} 与 x 、 y 轴相关性均较好，因此根据图13尚不能确定其实际的发震断层面。但若把该震相作为始破裂区出现的震相，则根据后面的 P_1 终止相所确定的震源断层面A为破裂面。若把该震相作为破出相，其判断结果也是断层面A为破裂面。

所得的破裂长度 l_0 比较符合始破裂尺度，如果将此破裂长度视为破出自由面的长度，由此得到的震源深度仅为5km左右，这一结果与国内、国外所测定的震源深度相比偏小较多。因此我们偏向于 P_0 初相为始破裂区所产生的震相。

在前面我们讨论过始破裂区产生的P波振幅是比较小的，为什么8月22日和8月23日两次地震的P波初相都比较显著呢？我们认为这与始破裂区应变能的释放条件有关。8月22日地震的震中位于8月16日地震的震源区端部，而8月23日地震的震中又是位于8月22日地震的震源区端部。因此这两次地震的 P_0 相比较显著。

3. 由终止相确定震源动力学参数

(1) 终止相 P_1

根据图12中的终止相 P_1 和 P_2 ，可以初步确认这次地震为双侧破裂。由于断层错动以倾滑为主，因此双侧破裂以表2中的断层面A走向或断层面B走向作为破裂方向。图14a、b为 ΔT_{P_1} 与 $\cos \psi_A$ 及 $\cos \psi_B$ 的相关图。由图可见， ΔT_{P_1} 与 $\cos \psi_A$ 的相关性较好，其直线方程为：

$$\Delta T_{P_1} = 12.3 + 5.8 \cos \psi_A \text{ ;}$$

$$L_1 = 34.9\text{km} \text{ ;}$$

$$v^* = 2.8\text{km/s} \text{。}$$

相关系数 $r = 0.98$ ，破裂方向指向北。由此结果可以看出，震源断层面走向为近南北向。

(2) 终止相 P_2

图14c、d为 ΔT_{P_2} 与 $\cos \psi_A$ 及 $\cos \psi_B$ 相关图。由图可见， ΔT_{P_2} 与 $\cos \psi_B$ 相关性较好。这说明震源断层面走向为 215° ，其直线方程为：

$$\Delta T_{P_2} = 17.4 - 2.9 \cos \psi_B \text{ ;}$$

$$L_2 = 17.7\text{km} \text{ ;}$$

$$v^* = 1.0 \text{ km/s}$$

相关系数 $r = 0.9$ ，破裂方向为南南西向。

为清楚起见，我们将这次地震的动力学参数汇总于表4中。由表4可以看出，这次大震的震源破裂过程是比较复杂的，它表现在双侧破裂的断层面走向是不同的，如图15所示。震源断层的总长度为53.1km，求得相应震级为6.9，显然这一震级与原来用地震波资料测得的震级相近。

表4 1976年8月23日松潘大震的震源动力学参数

| 长度 (km) | 始破裂区 | 向北破裂断层面 | 向西南破裂断层面 |
|---------|------|-------------|--------------|
| | | $L_0 = 6.8$ | $l_1 = 34.9$ |
| 破裂速度 | 2.9 | 2.8 | 1.0 |

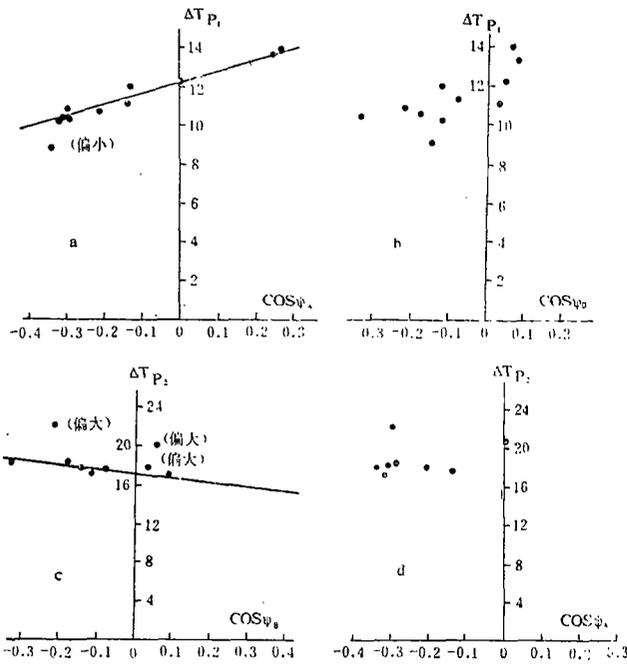


图14 ΔT_{P1} 、 ΔT_{P2} 与 $\cos\psi_A$ 及 $\cos\psi_B$ 相关图
Fig.14 Relative curve of ΔT_{P1} , ΔT_{P2} and $\cos\psi_A$, $\cos\psi_B$

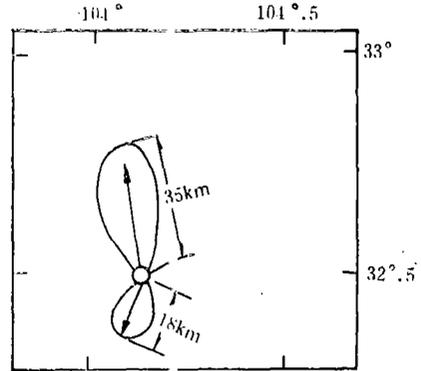


图15 1976年8月23日松潘地震震源断层双侧破裂示意图
Fig.15 Double direction breaking sketch of earthquake fault of the Songpan earthquake on August 23, 1976

五、讨论

1976年8月16日—23日松潘三次大震属续发性大震型。为讨论方便，将其震源破裂过程的动力学参数汇总于表5中。周蕙兰等从理论地震图得到的结果也一并列于表5中，以便对比参考。

下面对三个问题进行初略讨论

1. 续发大震震源区之间的嵌套关系

由表5可见，这几次大震的震源体有部分嵌套（如图16所示），因而造成地震强度大、

表 5 由初相、破出相及终止相确定的1976年松潘大震群震源动力学参数

| 有关参数 地震日期 | L ₀ (km) | L _B (km) | L ₁ (km) | L ₂ (km) | V ₁ [*] (km/s) | V _B [*] (km/s) | V ₁ [*] (km/s) | V ₂ [*] (km/s) | h (km) |
|--------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1976年8月16日 | 7.95 | 13.71 | 42.06 | 31.11 | 34 | 3.77 | 2.73 | 1.33 | h = 9.08 |
| 破裂方向 | 265 | 265 | 327 | 147 | | | | | L ₁ + L ₂ = 73.13 |
| 倾角 | 41.5 | 41.5 | 0° | 0° | | | | | |
| 周蕙兰等 | L ₁ + L ₂ = 0 | | | | | | | | h = 15 |
| 1976年8月22日 | 5.08 | | 23.74 | 19.88 | 215 | | 2.03 | 1.55 | L ₁ + L ₂ = 43.6 |
| 破裂方向 | 148 | | 328 | 148 | | | | | |
| 倾角 | 0 | | 0° | 0° | | | | | |
| 周蕙兰等 | L ₁ + L ₂ = 45 | | | | | | | | h = 10 |
| 1976年8月23日 | 5.8 | | 34.9 | 17.7 | 3.12 | | 2.8 | 1.0 | L ₁ + L ₂ = 52.6 |
| 破裂方向 | 264 | | 354 | 215 | | | | | |
| 倾角 | 32 | | 0° | 0 | | | | | |
| 周蕙兰等 | L ₁ + L ₂ = 60 | | | | | | | | h = 10 |

发震断层较短的特点，这可能是续发性大震型地震所特有的特点。例如尽管1976年8月16日松潘大震震源区北端有南坪中强震区，但这次地震时震源断层面的错动深入南坪中强震和其余震区达15km左右。第二次松潘6.7级地震时，其震源断层的西北段又深入到8月16日大震

区达23km，8月23日松潘大震时向北破裂错动的一支断层穿过了8月22日和8月16日大震区，从而形成了复杂的震源破裂过程。因此地震震型的判定十分重要，一旦根据有关资料判定未来大震为续发性大震型，则在估计其震级时应考虑未来大震震源体可能出现重叠的情况。根据终止相得到的松潘三次地震的总的震源体尺度（震源区重叠部分不计算在内）

$L_{总} = 42.06 + 31.11 + 17.7 = 90.7$ (km)，代入(1)式可求得相应的震级为7.4，其相应释放的地震能量约为 7.94×10^{22} 尔格。为了对比，我们求得松潘三次大震的累计能量

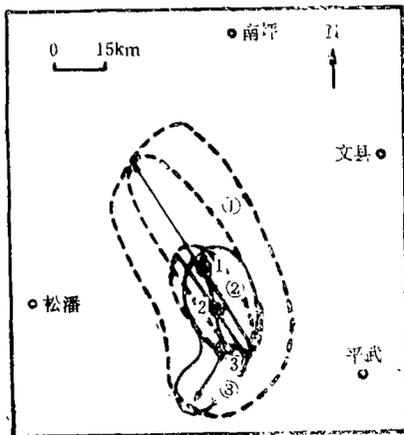


图16 松潘大震群破裂过程
Fig.16 Breaking process of the great Songpan earthquake swarm

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 3.98 \times 10^{22} + 7.08 \times 10^{21} + 1.41 \times 10^{22} = 6.098 \times 10^{22} \text{ (尔格)}$$

将E代入公式

$$tgEs = (11.8 + 1.5Ms) \tag{2}$$

可求得相应震级为7.32。这一结果与由上述震源尺度求得的震级相一致。因此在进行震群型地震预报中，应根据所圈定的震源体按多次地震能量释放来估计其各次地震的强度。

2. 续发大震初始破裂区的应变释放特点

对于三次大震来说,除了首次大震的始破裂区应变释放较少以外,后来的大震始破裂区的应变释放均比较显著,这可能是前一次大震的发生及其余震活动改善了后来大震始破裂区的应变释放条件。

3. 破裂速度与调整单元

松潘三次大震均为双侧破裂。我们发现,其破裂速度较大的一侧震源断层面端部存在调整单元,而另一侧调整单元不显著。例如,8月16日松潘大震震源区的西北端有南坪中强震所形成的调整单元;8月22日松潘大震震源区西北端有8月16日已发大震区作为调整单元;8月23日松潘大震震源区西南端有8月22日和8月16日两次大震所形成的调整单元。而在它们震源的另一侧调整单元不明显,破裂速度也较小。因此可认为调整单元让位程度愈好,断层面破裂传播速度大,终止相愈显著,反之则相反。这一结果,对地震灾害的预测有重要参考价值。

根据周蕙兰等对松潘三次大震的理论地震图研究,其反演的震源时间函数基本上为双阶梯函数。前一个时间长,后一个时间短,这后一个震源时间函数可能与终止相有关。为此有关终止相的理论反演尚需开展。

值得指出的是,终止相的研究依赖于震源断层面的破裂方向,因此破裂方向的精确确定是十分重要的。然而用P波初动所确定的震源机制解也可能并不始终符合由初始到终了的整个震源破裂过程,因为震源的破裂有可能有拐弯现象出现。在这种情况下,终止相时差与破裂轴之间的相关性必然很差。对于这种情况,应用终止相与初始P波时差反演震源的破裂过程,以便补充初动P波解。

(本文1989年1月28日收到)

参 考 文 献

- [1] 周蕙兰等, 1976年8月松潘两大地震的破裂机制, 中国科学技术大学学报, Vol.15, No.1, 1985.
- [2] 房桂荣、周蕙兰, 1976年8月22日松潘6.7级地震的破裂机制, 中国地震, Vol. 2, No. 1, 1986.
- [3] 何韞如等, 松潘强震记录的谱分析, 地震出版社, 1979.
- [4] 韩渭宾等, 松潘、平武地震和川青块体的运动, 地震科学研究, Vol. 1, No. 1, 1980.
- [5] 秦保燕、汪进, 组合模式与地震图上的终止相—兼论唐山地震震源的破裂过程, 西北地震学报, Vol.9, No. 2, 1987.
- [6] 四川省地震局业务处、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.

STUDY ON THE SOURCE RUPTURE PROCESS OF THE 1976
SONGPAN GREAT EARTHQUAKES USING THE
STOPPING PHASE

Qin Baoyan, Yao Lanyu, Wang Jin, Li Yarong
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)

Abstract

Using the initial phase, breakout phase and stopping phase of long period P-wave records of WWSSN, we have studied the source rupture process of the 1976 Songpan great earthquakes (Aug. 16, $M=7.2$; Aug. 22, $M=6.7$; Aug. 23, $M=7.2$), and got the dynamic parameters of sources of the three great earthquakes. The length of initial rupture area for the three great earthquakes is 8.5 and 6 km respectively, calculated by the weaker initial phase of P-wave. All of the three great earthquakes is two-side rupture, the rupture length of source body is 73, 34 and 54 km respectively.

The result shows that in the source regions, the three great earthquakes exist a part of superposition phenomena, so total source dimension is only 90 km; and the source depth is 9 km determined by the breakout phase of the Songpan great earthquake of Aug. 16. It is also found that the obvious stopping phase and quicker rupture speed of source fault are related to the adjustment element located at the ends of source region.