

用 SH 波和 P 波振幅比确定震源机制解

吴大铭

(美国宾厄姆顿纽约州立大学地球科学系)

王培德 陈运泰

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

使用三分向数字地震仪记录的地震资料,进行了 SH 和 P 波最大振幅比的反演,求得了震源参数的最小二乘解。本文确定的 1981 年河北省滦县震群的震源机制解为:走向 98° , 倾角 54° , 滑动角 -114° ; 1982 年 7 月云南省剑川地震的震源机制解为:走向 199° , 倾角 40° , 滑动角 -110° ; 1982 年 10 月河北省卢龙地震的震源机制解为:第一条断裂,走向 270° , 倾角 65° , 滑动角 -135° ; 第二条断裂,走向 195° , 倾角 80° , 滑动角 -165° 。

关键词 震源机制解;振幅比;最小二乘解

一、引 言

震源参数的测定是地震学中的一项基础工作。如果有了比较接近实际的地壳速度模型、方位角分布较完整的台网及准确的时间服务系统,则以记录到的 P 波和 S 波到时,用反演的方法可得到较客观和准确的震源位置及发震时刻。对于震源的其它参数如断层走向,倾角及滑动角的测定,也可利用类似的方法求解。已经使用的有用 P 波初动方向或 S 波偏振角度来作震源机制反演的方法^[1]。Kisslinger^[2,3] 在 1980 年首先提出,用 SV 波和 P 波两者垂直分量的振幅比数据,作震源机制反演的方法。他指出了 $(SV/P)_\perp$ 对于确定节面的重要性。梁尚鸿等^[4] 以广义射线理论地震图为基础,作 $(SV/P)_\perp$ 反演。我们知道,利用 SV 波可能会遇到两个问题:①由于接近于地面的低速层的存在,先于 SV 波到达的 SV-P 转换波的振幅可能较直达 SV 波的振幅为大;②在某些距离上,SV 波入射角接近或超过它的临界角,造成其振幅异常,并有相位变化。这二个問題可能导致反演结果的不准确。

SH 波在理论和实际上都比较简单,类似于 SV 波的问题不会产生。但使用 SH 波对资料的要求较高,必须有二个水平向的记录,且最好是数字化记录,以便于通过坐标变换求出横向运动。

使用 SH/P 与使用 (SV/P)_z 及 S 波偏振的资料类似,在地震小于 3—4 级时,它们与地震矩(或震级)无关。因而,我们可以将一组在同一地区的小震资料结合起来,求综合震源机制解。

在中美合作项目“近场强地面运动研究”执行过程中,我们取得了相当数量的 $M_L \leq 4.8$ 的地震加速度记录。根据我们工作的经验,在 10—15 km 震中距以内,尽管只有 4—5 个台站的资料,但由于有了可靠的 P 波和 S 波到时的资料,我们可以将定位精度保持在 1 km 以内^[5],本文又在这个基础上将二个水平分向的记录转换为沿径向及切向的地震图,从而得出 SH 波。在由 SH/P_z 作震源机制反演时,一般有 5 个及 5 个以上的台站记录数据即可得出结果。也可由多个地震求得综合断层面解。

二、原 理

如图 1 所示,断层面的参数为: 断层走向 ϕ_s , 倾角 δ , 滑动角 λ , 地震波的离源角 i_s , 接收台站的方位角 ϕ 。在此情况下,均匀介质中辐射图型因子为^[6]:

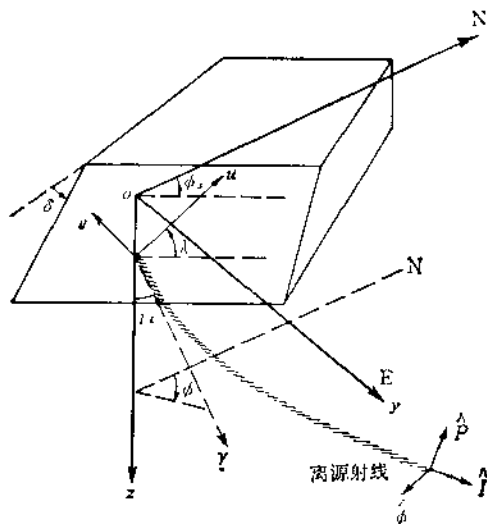


图 1 断层面及其参数

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^P = & \cos \lambda \sin \delta \sin^2 i_s \sin 2(\phi - \phi_s) \\ & - \cos \lambda \cos \delta \cdot \sin 2i_s \cos(\phi - \phi_s) + \sin \lambda \sin 2\delta [\cos^2 i_s \\ & - \sin^2 i_s \cdot \sin^2(\phi - \phi_s)] \\ & + \sin \lambda \cos 2\delta \sin 2i_s \sin(\phi - \phi_s) \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{SH} = & \cos \lambda \cos \delta \cos i_s \sin(\phi - \phi_s) + \cos \lambda \sin \delta \sin i_s \\ & \cdot \cos 2(\phi - \phi_s) + \sin \lambda \cos 2\delta \cos i_s \cos(\phi - \phi_s) \\ & - \frac{1}{2} \sin \lambda \sin 2\delta \sin i_s \\ & \cdot \sin 2(\phi - \phi_s) \quad (2) \end{aligned}$$

若将 SH 波与 P 波理论振幅比记为 Q_T , 则

$$Q_T = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^3 \frac{\mathcal{F}^{SH}}{\mathcal{F}^{SV}} \quad (3)$$

根据上述表达式可求得该振幅比对于各震源参数的偏导数。

我们的目的是求解一组参数 ϕ_s, δ, λ , 使理论计算值与一组台站观测振幅比 Q_o 的方差和为最小。

$$\sum_{i=1}^n (Q_{Ti} - Q_{oi})^2 = \min \quad (4)$$

n 为观测值的数目。具体计算方法与通常的最小二乘法并无很大差别,即先给定一组初始值 $(\phi_{s0}, \lambda_0, \delta_0)$, 若认为观测值与理论值的偏差是由震源参数的偏差所引起的,便可得一组观测方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_{T1}}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \frac{\partial Q_{T1}}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial Q_{T1}}{\partial \delta} \Delta \delta = Q_{T1} - Q_{o1} \\ \frac{\partial Q_{T2}}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \frac{\partial Q_{T2}}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial Q_{T2}}{\partial \delta} \Delta \delta = Q_{T2} - Q_{o2} \\ \vdots \\ \frac{\partial Q_{Tn}}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \frac{\partial Q_{Tn}}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial Q_{Tn}}{\partial \delta} \Delta \delta = Q_{Tn} - Q_{on} \end{cases} \quad (5)$$

用最小二乘法求解上述方程组,求得 $\Delta \phi_i$, $\Delta \lambda$, $\Delta \delta$ 三个修正值。在叠代过程中,以修正了的初始值作为初值,进行下一次迭代,方差之和最小时的解就是我们欲求之解。

三、资 料 处 理

在我们的工作中使用的是由 DCS-302 三分向数字磁带地震仪记录的数字量。该记录器配合 SSA-302 三分向伺服加速计,在 0—30 赫兹的频率范围内有相当平坦的频响曲线^[7]。原始数据记录是按南-北、东-西、垂直三个方向设定的。经由 HYPD-71 程序定位后,取震中到台站的矢径,将二个水平分量的记录转换为沿径向和切向的地震图。其切向分量的最大值即为 SH 波的最大振幅值。图 2 为剑川 1981 年 7 月 20 日 15 时 12 分 $M_L 4.8$ 地震在剑川县天马村台记录的加速度图,该图已经方向转换,三个分量依次为沿径向、切向和垂直向。图 3 为该记录经积分后所绘制的位移图。地震波入射到自由表面将产生反射, P 波入射到自由表面产生反射的 P 波和 SV 波, SH 波入射到自由表面只产生反射的 SH 波。安置于地面的仪器记录到的地面运动是入射波与反射波的叠加。就 SH 波而言比较简单,只需取记录的地面运动最大振幅的一半即可得到入射的 SH 波振幅。对 P 波而言,如以 i 表示入射角, i^* 表示反射 P 波的出射角, j 表示反射 SV 波的出射角,其射线和振动方向如图 4 所示;其地面垂直运动的最大振幅应为^[6]:

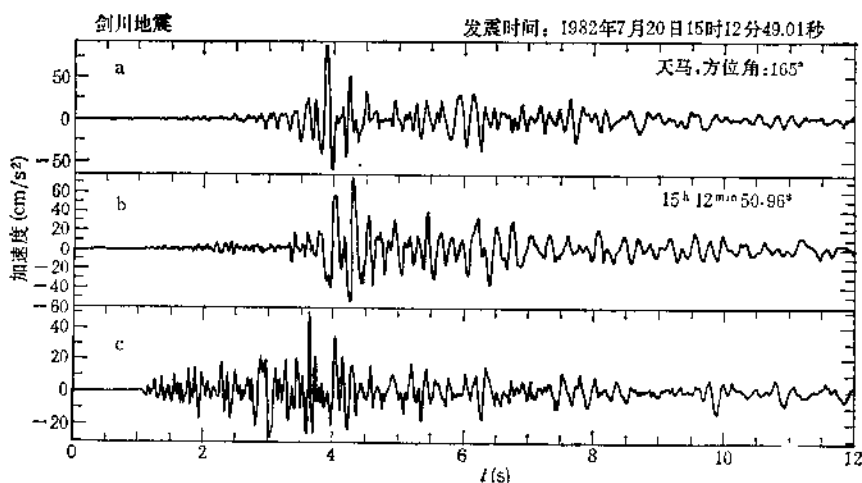
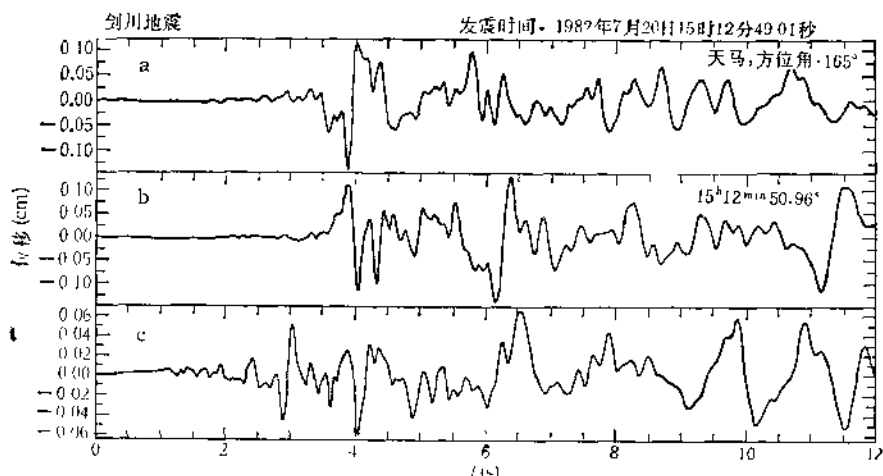


图 2 天马村记录的剑川 $M_L = 4.8$ 地震的加速度图

a. 径向方向; b. 切向分量; c. 垂直向分量

图3 天马村记录的剑川 $M_L = 4.8$ 地震的位移图

a. 径向分量; b. 切向分量; c. 垂直向分量

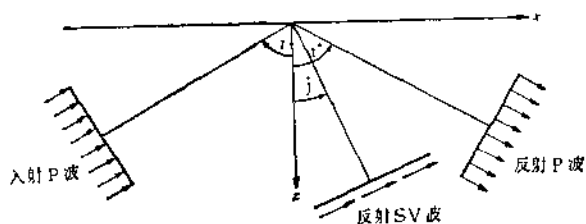


图4 平面P波入射到自由表面及产生的反射波

$$-A \cos i + A \cos i \dot{P}\dot{P} - A \sin i \dot{P}\dot{S} \quad (6)$$

A 为入射波最大振幅, $\dot{P}\dot{P}$, $\dot{P}\dot{S}$ 分别为反射 P 波和 S 波的反射系数:

$$\dot{P}\dot{P} = \frac{-\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)^2 + 4p^2 \frac{\cos i}{\alpha} \frac{\cos j}{\beta}}{\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)^2 + 4p^2 \frac{\cos i}{\alpha} \frac{\cos j}{\beta}} \quad (7)$$

$$\dot{P}\dot{S} = \frac{4 \frac{\alpha}{\beta} p \frac{\cos i}{\alpha} \left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)}{\left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2\right)^2 + 4p^2 \frac{\cos i}{\alpha} \frac{\cos j}{\beta}} \quad (8)$$

式中 α 为 P 波波速, β 为 S 波波速, p 为射线参数。(6) 式可写为

$$-A(\cos i - \cos i \dot{P}\dot{P} + \sin i \dot{P}\dot{S}) \quad (9)$$

因子 $(\cos i - \cos i \dot{P}\dot{P} + \sin i \dot{P}\dot{S})$ 随入射角 i 的变化而变化, 当 i 的取值范围从 35° 到 70° 之间时, 该因子从 1.56 变到 0.71, 对于近场小孔径台网和区域性台网, 直达波的人射角大都在此范围内, 该因子的值与 1 相差不大, 因而我们可以用所记录的垂直分量的最大振幅近似地代表入射 P 波的最大振幅。

在节面附近,振幅比会达到一个很大的数值,从而理论与观测值的差值在节面附近也会很大,在迭代中修正项 $\Delta\phi_i$, $\Delta\lambda$, $\Delta\delta$ 的变化幅度也会比较大,从而导致迭代过程的不稳定. 本文用加入控制常数 c 的办法来解决迭代过程的不稳定问题,将各次迭代中的修正项改为 $\Delta\phi_i/c$, $\Delta\lambda/c$, $\Delta\delta/c$, ($c \geq 1$). 从 $c = 1$ 起计算,用人机对话方式选择 c 的数值,并在程序中安排自动最小方差和搜索,以求得最优解.

地震波射线的离源角 i_s 是在震中交切时得到的,在计算中作为已知参数加入.

四、滦县、卢龙和剑川地震的震源机制解

运用上述方法,我们求出了用 DCS-302 地震仪构成的流动数字记录台网所记录的发生于 1981 年 9 月至 10 月河北省滦县震群,1982 年 7 月 3 日云南省剑川 $M_s = 5.4$ 地震的余震,以及 1982 年 10 月河北省卢龙 $M_L = 6.1$ 地震余震的震源机制解. 有关上述地震震源位置及台站分布情况请参阅文献[8,9],此处恕不赘述.

图 5 为滦县震群根据 P 波初动和 S 波偏振所确定的震源机制解. 图 6 为根据 SH/P 振幅比和 S 波偏振所确定的震源机制解,图中用六角形的直径表示该接收点的振幅比. 可以看出,SH/P 确实在节面附近达到较大的数值. 据 SH/P 波振幅比反演所得的震源机制解为: 走向 $\phi_s = 98^\circ$, 倾角 $\delta = 54^\circ$, 滑动角 $\lambda = -114^\circ$. 与用 P 波初动, S 波偏振所确定的机制解相当一致.

图 7 为据 P 波初动和 S 波偏振所绘制的剑川地震震源机制解. 图 8 为据 S 波偏振和 SH/P 振幅比绘制的剑川地震震源机制解. 据 SH/P 波反演的结果,剑川地震余震的综合断层面解的参数为: 走向 $\phi_s = 199^\circ$, 倾角 $\delta = 40.7^\circ$, 滑动角 $\lambda = -110^\circ$. 在文

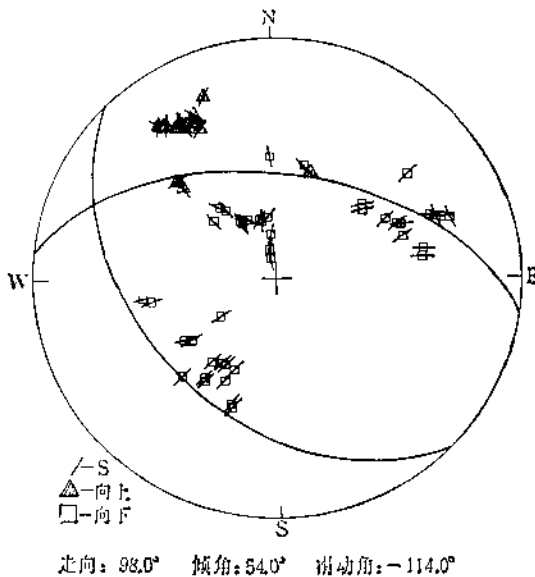


图 5 据 P 波初动和 S 波偏振确定的滦县震群综合断层面解

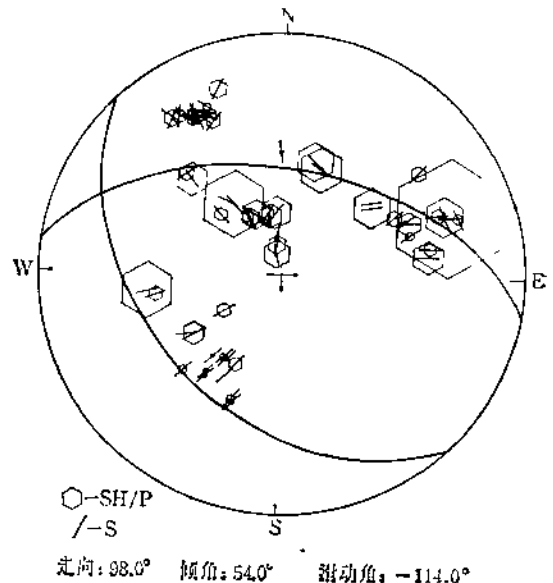
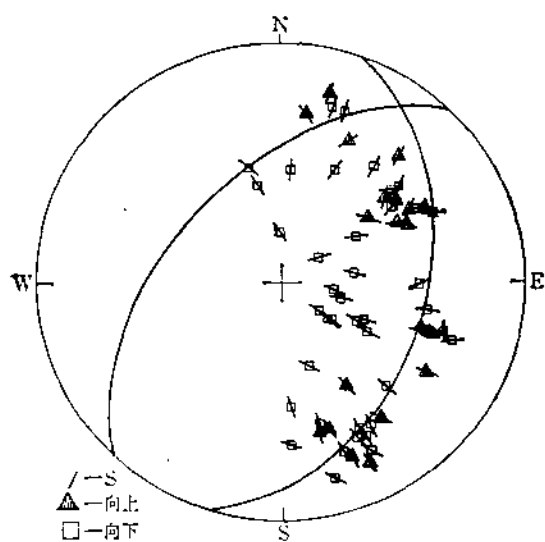
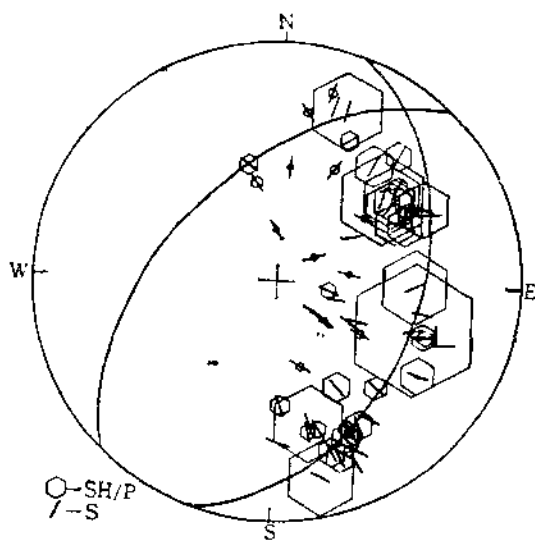


图 6 据 SH/P 振幅比和 S 波偏振确定的滦县震群综合断层面解



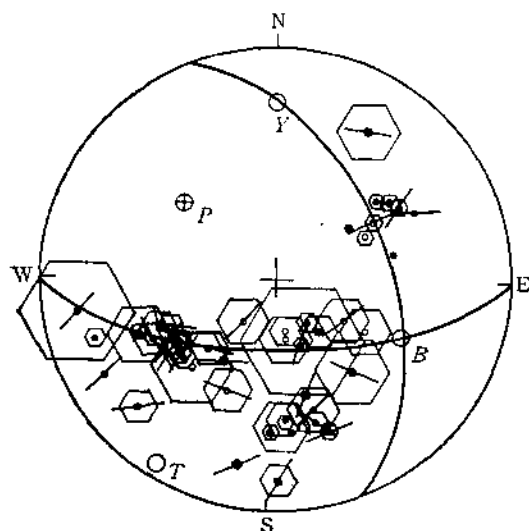
走向: 199.0° 倾角: 40.0° 滑动角: -110.0°

图7 据P波初动和S波偏振确定的剑川地震部份余震的综合断层面解



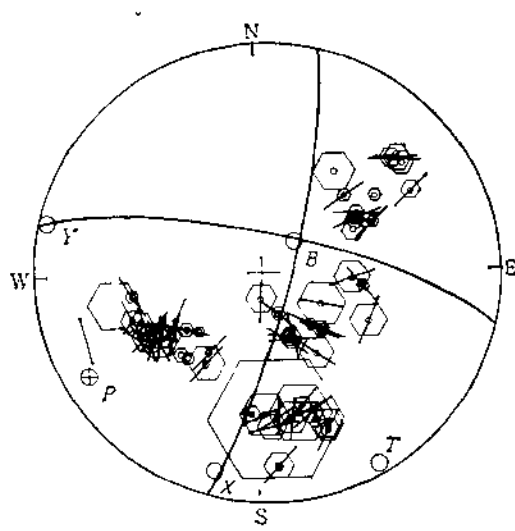
走向: 199.0° 倾角: 40.0° 滑动角: -110.0°

图8 据SH/P波振幅比和S波偏振确定的剑川地震部分余震的综合断层面解



走向: 270° 倾角: 85° 滑动角: -135°

图9 据P波初动, S波偏振和SH/P振幅比所确定的卢龙地震第一条断裂的综合断层面解



走向: 195° 倾角: 20° 滑动角: -165°

图10 据P波初动, S波偏振和SH/P振幅比所确定的卢龙地震第二条断裂的综合断层面解

献[5]中曾提出: 剑川地震的发展构造是一个铲形, 在张应力作用下的正断层。断裂发生在盆地西侧的底部。根据震源位置分布, 可以判断该断层是倾向西侧的正断层, 倾角约在 $30^\circ-40^\circ$ 之间。我们以SH/P波振幅比确定的震源机制解结果支持这一结论。

卢龙地震的震源机制比较复杂, 由余震的分布可以看到两条断裂^[9], 这两条断裂不是

共轭的而是准平行的。运用 SH/P 振幅比反演的方法, 求各个余震的断层面解, 将震源机制相近的地震归并, 可得两组地震, 再求这两组地震的综合断层面机制解。所得参数为, 第一条断裂: 走向 $\phi_1 = 270^\circ$, 倾角 $\delta = 65^\circ$, 滑动角 $\lambda = -135^\circ$ 。第二条断裂: 走向 $\phi_2 = 195^\circ$, 倾角 $\delta = 80^\circ$, 滑动角 $\lambda = -165^\circ$ 。图 9 和图 10 是这二条断裂的综合断层面解。通过对卢龙地震的分析可以知道, 对于即使是震源机制比较复杂的地震, SH/P 波振幅比求解震源机制解的方法也可以发挥作用。

参 考 文 献

- [1] Herrman, R. B., 1975. A student's guide to the use of P and S wave data for focal mechanism determination. *Earthq. Notes*, **46**, 4, 29—39.
- [2] Kisslinger, C., 1980. Evaluation of S to P amplitude ratio for determining focal mechanisms from regional network observation. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **70**, 999—1014.
- [3] Kisslinger, C., Bowman, J. R. and Kock, K., 1981. Procedures for computing focal mechanisms from local (SV/P)_z data. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **71**, 1719—1729.
- [4] 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 朱碁定, 1984. 利用区域地震台网 P, S 振幅比资料测定小震震源参数. *地球物理学报*, **27**, 249—258.
- [5] 吴大铭, 王培德, 1986. 剑川地震余震研究及剑川地震发展构造. *地震研究*, **10**, 1, 29—36.
- [6] Aki, K., and Richards, P. G., 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, Vol. 1, W. H. Freeman, San Francisco.
- [7] 王培德, 1981. 一种新型的数字磁带记录地震仪——DCS-302 型地震仪. *地震科学研究*, **3**, 62—64.
- [8] Wang, P. D., Song, L. Y., and Wu, F. T., 1985. Near-field seismic observation with a mobile little aperture network. *Geophysical Research*, **1**, 215—227.
- [9] Wu, F. T., Song, L. Y., Wang, P. D., 1984. A ground motion synthesis study using small earthquake as Green's function. *Proceedings of International Workshop on Earthquake Engineering*, A-21 Tongji University.

DETERMINATION OF FOCAL MECHANISM USING SH TO P AMPLITUDE RATIO

Francis T. Wu¹⁾, Wang Peide²⁾ and Chen Yuntai²⁾

1) Department of Geological Sciences and Environmental Studies, State University of New York, Binghamton, New York 13901, U. S. A

2) Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing, China

Abstract

Least squares method is used to invert source parameters from data recorded by a three-component digital seismograph. It is found that the focal mechanism parameters of the September 1981 Luanxian, Hebei, earthquake swarms are: strike 98° , dip 54° , rake -114° ; that of the July 1982 Jianchuan, Yunnan, earthquake are: strike 199° , dip 40° , rake -110° ; that of the October 1982 Lulong, Hebei, earthquake are: first group, strike 270° , dip 65° , rake -135° ; second group, strike 195° , dip 80° , rake -165° .

1983年11月7日菏泽5.9级 地震震源过程研究

刘万琴

(国家地震局地球物理研究所)

魏光兴 周翠英

(山东省地震局)

摘 要

本文用178个国内外地震台的P波初动符号,作出山东省菏泽地震($M_s = 5.9$)的断层面解,并用广义瑞雷波方向性函数得到这个地震的破裂方向为北东,破裂速度和破裂长度分别为0.6 km/s 和3 km. 由瑞雷波谱得 $M_0 = 1.7 \times 10^{20} \text{N} \cdot \text{cm}$. 这次地震发生在菏泽地震巢的西南端. 震前几个月,地震巢的地震活动处于平静期. 与此同时,据大地测量资料表明,在地震巢及其附近平均隆起2 mm. 我们推测震前地震巢及其附近存在断层蠕变,使得应力弱化,从而使其西南端的震源区应力增加而发生5.9级地震.

关键词 山东省菏泽;地震震源过程

一、引 言

1983年11月7日北京时间05点09分46.2秒,山东省菏泽市附近发生一次 $M_s = 5.9$ 地震. 经山东省地震台网测定:震中位置为东经 $115^\circ 17'$, 北纬 $35^\circ 17'$, 震源深度12 km. 山东省地震局李家灵等据宏观调查资料给出,这次地震的宏观震中是 $115^\circ 16'E$, $35^\circ 14'N$. 震中烈度为VII度,极震区为VII度强,地震发生后,在震中附近安装五个临时地震台,主震发生后20多天时间内共记到45次余震,最大余震 $M_L = 3.3$. 这次地震序列衰减快而余震分布集中. 由于这次地震发生在1937年菏泽7.0级和 $6\frac{3}{4}$ 级地震的震中区内,因而这地区一直受到地震工作者的关注. 自1970年以来,在震中周围80 km的范围内陆续建立四个地震台,能监视震中附近 M_L 大于2的地震. 另外,在震中以北约九公里处布有一条东明到菏泽的水准测线,自五十年代起到现在已进行过多次测量,特别是在震前五年,每年都有测量结果,为研究震源过程提供了重要的信息.

本文利用广义瑞雷波方向性函数,估计了这个地震的破裂过程并探讨其孕震过程.

二、菏泽5.9级地震的断层面解及破裂过程

从国际地震中心(ISC)的地震报告和中国地震报告以及山东省、河南省等地震报告