

用水准测量资料反演 1990 年青海共和地震的震源机制*

赵 明 陈运泰

(国家地震局地球物理研究所, 北京 100081)

巩守文 王庆良

(国家地震局第二地形变监测中心, 西安 710054)

摘 要

利用地面垂直形变测量资料研究了 1990 年 4 月 26 日青海共和 M_s 6.9 地震的震源机制。通过反演得出这次地震是由逆冲倾滑为主的断层错动引起的。该断层走向 102° , 倾向 SW, 倾角 46° , 长 40km, 宽 9km, 断层上部边界至地面的垂直距离 3km, 下部边界至地面的垂直距离 10km。逆冲倾滑错距 79cm, 伴以错距 5cm 的左旋走向滑动。这是一次低应力降 (3.8MPa) 的板内地震, 应变降为 5.7×10^{-5} , 地震矩 $9.8 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$, 能量释放 $5.0 \times 10^{11} \text{J}$ 。由反演得到的共和地震的震源机制与等震线的形态、余震的空间分布以及共和盆地断层交汇的特征总体上是一致的。

关键词: 震源机制 水准测量 青海共和地震 反演 板内地震 青藏高原

1 引 言

1990 年 4 月 26 日青海共和 M_s 6.9 地震 (图 1) 发生在历史上无中强地震记载、近期小震活动也甚微弱的共和盆地内部。因此, 研究清楚发生于青藏高原的这个板内地震的震源机制, 对了解该地区地震动力及其来源是很有意义的。

国家地震局第二地形变监测中心在震前的 1979 年以及震后的一个半月时间内, 在这次地震的极震区进行了重复大地水准测量, 取得了包围震中的东西长 100km, 南北宽 60km 范围内的地面垂直形变资料。本文是运用这些资料研究这次地震的震源机制的结果。

2 地震位移场

设地震震源为一埋藏于均匀、各向同性和完全弹性的半无限介质中的矩形断层, 长 $2L$, 宽 W , 上界 d , 下界 D , 倾向滑动错距 ΔU_1 , 走向滑动错距 ΔU_2 。在震源坐标系 (图 2) 中, 这一断层产

本文 1992 年 4 月 20 日收到

* 国家地震局地球物理所论著编号 92A0036

生的地表垂直位移 u_3 为^[1]

$$u_3 = u_3^{(s)} + u_3^{(c)} \quad (1)$$

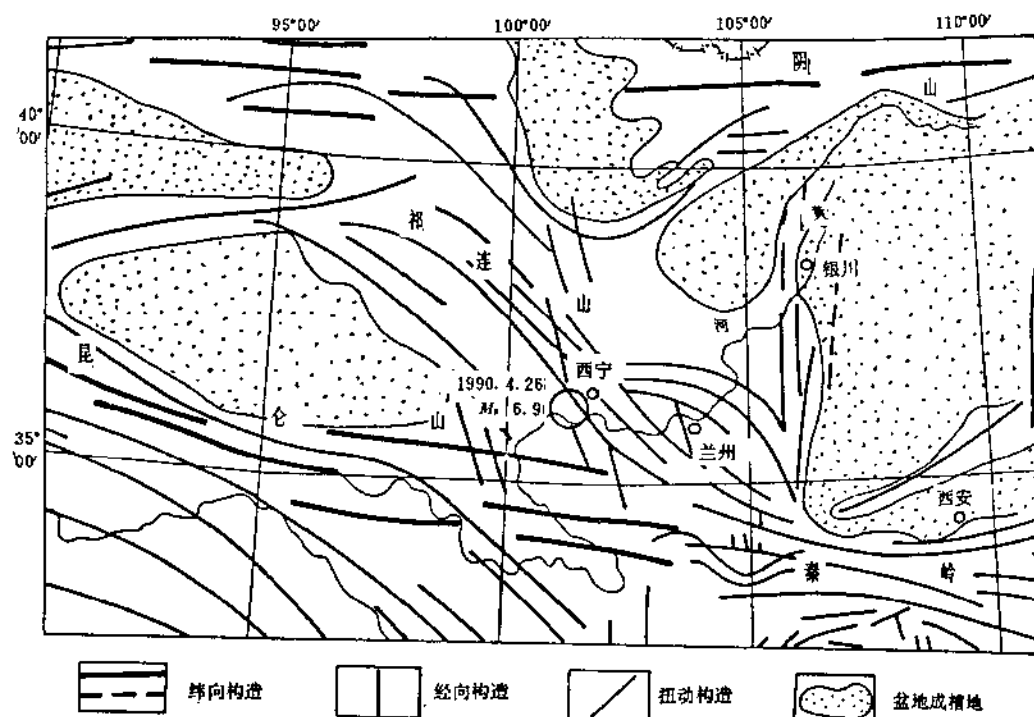


图 1. 共和地震震中位置和周围地区地质构造图

Fig. 1 Epicentral location of Gonghe earthquake and geologic structure in ambient region

$$8\pi \frac{u_3^{(s)}}{\Delta U_s} = \cos\theta \left[2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(R+r_3-\zeta) + 2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \left(1 + \frac{1+\delta}{\delta} \tan^2\theta \right) \ln(Q+q_3+\zeta) \right. \\ \left. - 2 \frac{1-\delta}{\delta} \tan\theta \sec\theta \ln(Q+x_3+\zeta_3) \right] + \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{r_2 \sin\theta}{R} \\ + \frac{4}{1+\delta} \sin\theta \left[\frac{2-3\delta}{Q} q_2 + \frac{(3\delta-1)x_2 \sin\theta}{Q} \right] - \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{r_2^2 \cos\theta}{R(R+r_3-\zeta)} \\ + \frac{4}{1+\delta} \frac{[(4\delta-1)\sin^2\theta - \delta]q_2 x_3 - (1-\delta)q_2 q_3 \sin\theta - \delta x_2 x_3 \sin\theta - \delta q_3 x_2 \sin^2\theta}{Q(Q+q_3+\zeta)} \\ + \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{q_2 x_3 \sin\theta [(x_3+\zeta_3) - q_3 \sin\theta]}{Q^3} - \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{q_2^2 q_3 x_3 \cos\theta \sin\theta}{Q^3(Q+q_3+\zeta)^2} \quad (2)$$

$$8\pi \frac{u_3^{(c)}}{\Delta U_c} = \sin\theta \left\{ (x_2 - \zeta_2) \left[\frac{4\delta}{1+\delta} \frac{(x_3 - \zeta_3)}{R(R+x_1 - \zeta_1)} + \frac{4}{1+\delta} \frac{(x_3 - \zeta_3)}{Q(Q+x_1 - \zeta_1)} \right] \right. \\ \left. - \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{\zeta_3 x_3 (x_3 + \zeta_3)}{Q^3(Q+x_1 - \zeta_1)^2} \right\} - 4 \frac{1-\delta}{\delta} \tan^{-1} \frac{(x_1 - \zeta_1)(x_2 - \zeta_2)}{(h+x_3+\zeta_3)(Q+h)} \\ + 2 \tan^{-1} \frac{(x_1 - \zeta_1)(r_3 - \zeta)}{r_2 R} - \frac{2}{\delta} \tan^{-1} \frac{(x_1 - \zeta_1)(q_3 + \zeta)}{q_2 Q} \left\{ \right. \\ \left. + \cos\theta \left[2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(R+x_1 - \zeta_1) - 2 \frac{1-\delta}{1+\delta} \ln(Q+x_1 - \zeta_1) - \frac{4\delta}{1+\delta} \frac{(x_3 - \zeta_3)^2}{R(R+x_1 - \zeta_1)} \right] \right. \\ \left. - \frac{4}{1+\delta} \frac{[(x_3 + \zeta_3)^2 - 2\delta \zeta_3 x_3]}{Q(Q+x_1 - \zeta_1)} - \frac{8\delta}{1+\delta} \frac{\zeta_3 x_3 (x_3 + \zeta_3)^2}{Q^3(Q+x_1 - \zeta_1)^2} \right\}$$

$$+ 4x_3 \left\{ \cos\theta \sin\theta \left[\frac{2(q_3 + \zeta)}{Q(Q + x_1 - \zeta_1)} + \frac{(x_1 - \zeta_1)}{Q(Q + q_3 + \zeta)} \right] - q_3 \frac{(\sin^2\theta - \cos^2\theta)}{Q(Q + x_1 - \zeta_1)} \right\} \quad (3)$$

$u_3^{(r)}, u_3^{(d)}$ 分别是走向和倾向滑动产生的地面垂直位移, θ 为断层面与地面的夹角, 常数 δ 是由拉梅常数和泊松比 σ 表示的量:

$$\delta = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 3\mu} = \frac{1}{3 - 4\sigma} \quad (4)$$

(2) 和 (3) 式的右边诸项均应代入二重积分的上、下限, 即:

$$[f(\zeta_1, \zeta)]_{\parallel} = f(L, D) - f(L, d) - f(-L, D) + f(-L, d) \quad (5)$$

r_2, r_3, q_2, q_3, R, Q 各量定义如下(图 3):

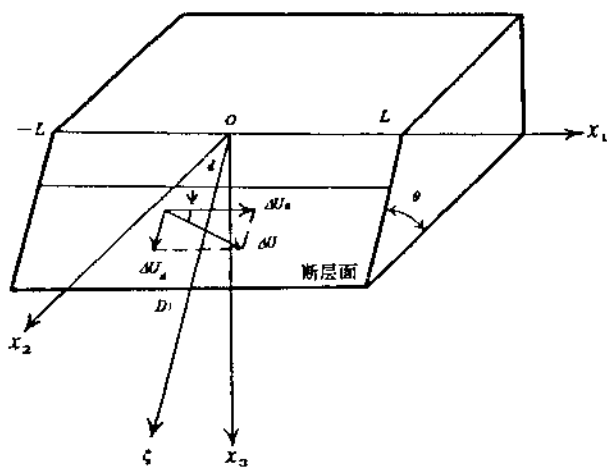


图 2 任意倾角的矩形断层错动模式

Fig. 2 Displacement model of rectangular fault with arbitrary tilt

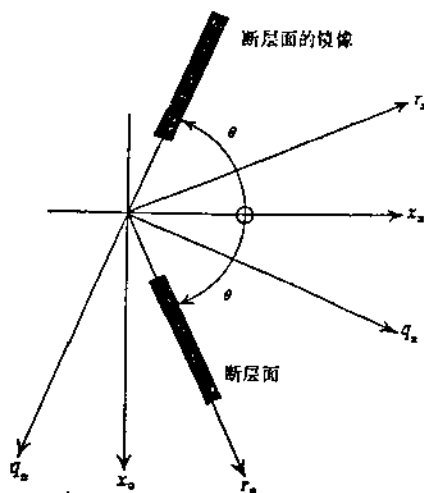


图 3 断层面和它的镜像

Fig. 3 Fault plane and its mirror image

$$r_2 = x_2 \sin\theta - x_3 \cos\theta, \quad r_3 = x_2 \cos\theta + x_3 \sin\theta \quad (6)$$

$$q_2 = x_2 \sin\theta + x_3 \cos\theta, \quad q_3 = -x_2 \cos\theta + x_3 \sin\theta \quad (7)$$

$$R^2 = (x_1 - \zeta_1)^2 + (x_2 - \zeta_2)^2 + (x_3 - \zeta_3)^2 = (x_1 - \zeta_1)^2 + r_2^2 + (r_3 - \zeta)^2 \quad (8)$$

$$Q^2 = (x_1 - \zeta_1)^2 + (x_2 - \zeta_2)^2 + (x_3 + \zeta_3)^2 = (x_1 - \zeta_1)^2 + q_2^2 + (q_3 + \zeta)^2 \\ = (x_1 - \zeta_1)^2 + h^2 = k^2 + (q_3 + \zeta)^2 \quad (9)$$

h 和 k 的意义如图 3 所示。

3 震源参数的反演

设震源坐标系的原点在地理坐标系中的坐标为 $(s_1, s_2, 0)$, 则地理坐标为 $(X_1, X_2, 0)$ 的地面上任一点的垂直位移为:

$$u_3 = u_3(\alpha, \theta, L, d, D, \Delta U_s, \Delta U_d, s_1, s_2; X_1, X_2) \quad (10)$$

若以 $x_j (j=1, 2, 3, \dots, 9)$ 依次表示 (10) 式中的模型参数 $\alpha, \theta, L, d, D, \Delta U_s, \Delta U_d, s_1, s_2$, 以 y_i 表示第 i 个观测点的垂直位移, 则

$$y_i = f_i(x_j) \quad (11)$$

以 y'_i 表示位移的第 i 个观测值, 以 $y_i = f_i(x_j)$ 表示相应的理论计算值, 则残差为^[2]:

$$e'_i \equiv y'_i - f_i(x_j), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

将 $f_i(x_j)$ 在某一初始值 x_j^0 处作泰勒展开, 略去二次和二次以上的高次项, 则有:

$$e'_i \doteq e_i \equiv y'_i - [f_i(x_j^0) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \bigg|_{x_j^0} \Delta x_j] \quad (13)$$

上式可写为:

$$e_i = \Delta y_i - A_{ij} \Delta x_j \quad (14)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_j &= x_j - x_j^0 \\ \Delta y_i &= y'_i - f_i(x_j^0) \\ A_{ij} &= \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right] \bigg|_{x_j^0} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

以矩阵形式表示(14)式, 则有:

$$e = \Delta y - A \Delta x \quad (16)$$

若观测方程的个数 n 多于模式参数的个数 m , 则可以按最小二乘准则求解, 这就是按残差平方和取极小值的准则求 Δx 的估计值 $\hat{\Delta x}$. 按最小二乘准则可以得到下列正则方程:

$$A^T A \hat{\Delta x} = A^T \Delta y \quad (17)$$

如果 $A^T A$ 是非奇异矩阵, 则可得到:

$$\hat{\Delta x} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta y \quad (18)$$

为了避免奇异性, 可以采用阻尼最小二乘法, 此时, 与(18)式相应的方程为:

$$\hat{\Delta x} = (A^T A + \theta^2 I)^{-1} A^T \Delta y \quad (19)$$

式中 θ^2 为阻尼系数, I 为单位矩阵。

用模式参数向量的初值 x_j^0 , 可以由(11)和(15)式分别计算出 $f_i(x_j^0)$ 和 A_{ij} , 进而求得 Δy_i . 将 Δy_i 和 A_{ij} 代入(19)式便可求得 $\hat{\Delta x}_j$. 然后将 $\hat{\Delta x}_j$ 加到初值 x_j^0 上, 作为新的初值。如此反复迭代, 当残差满足收敛准则时, 便停止迭代, 此时的 $x_j^0 + \Delta x_j$ 便是最优解 $\hat{x}_j$ 。

4 数字试验

利用国家地震局第二地形变监测中心地震前后在极震区及其附近 27 个水准点上测得的地面垂直位移(图 4), 使用上节叙述的方法来反演共和地震的震源参数。能否用这些数量十分有限的资料反演出表征震源的 9 个参数呢? 为了研究这个问题, 我们在使用真实资料反演前做了一系列数字试验。

4.1 用理想化的均匀分布的 150 个观测点的数据作反演试验

我们由预先给定的一组参数值计算了该断层模式在包围震中 $105\text{km} \times 70\text{km}$ 范围内均匀分布的 150 个点的垂直位移。在每个点的计算位移值上加上标准偏差为 5mm 的正态分布的随机误差作为垂直位移的“观测值”, 并以偏离该断层模式参数的较大的初值做反演。表 1 是数字试验的结果, 可以看出反演结果与真值偏差很小。这说明用多达 150 个围绕震中均匀分布的观测点的垂直形变资料能够很有效地反演震源参数。

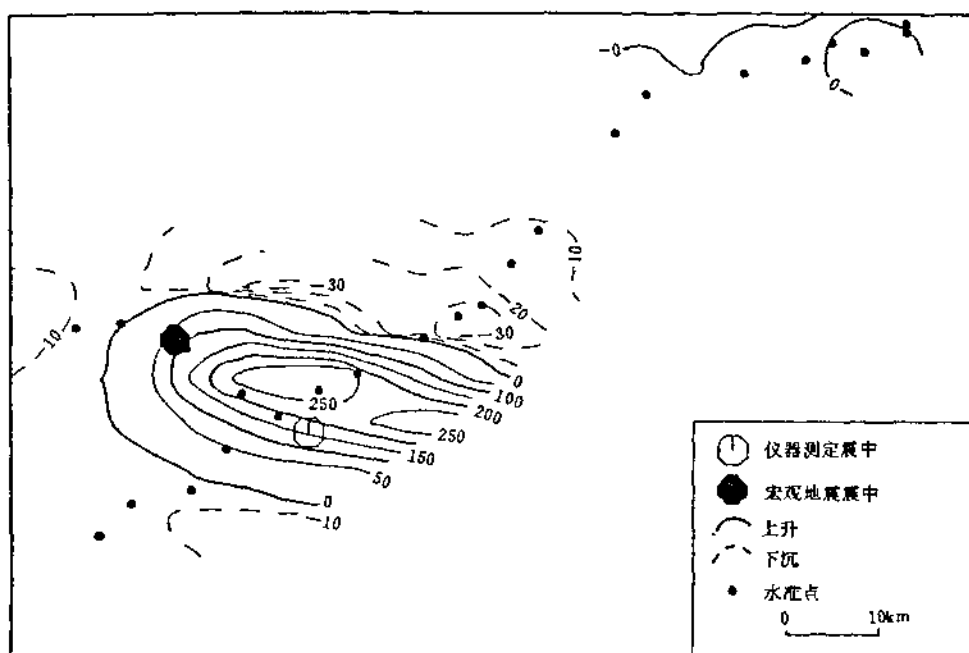


图 4 共和地震引起的垂直形变图

Fig. 4 Vertical displacements caused by Gonghe earthquake

表 1 用理想化的、均匀分布的 150 个观测点的垂直形变资料进行反演试验

Table 1 Results of reverse computation by vertical deformation data of 150 ideal and well-distributed points

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$L(\text{km})$	$d(\text{km})$	$D(\text{km})$	$\Delta U_s(\text{cm})$	$\Delta U_d(\text{cm})$
理论值	160	60	15	5	20	10	100
初 值	100	30	6	5	28	50	100
反演结果	159.9	59.2	15.1	4.9	20.6	10.1	97.1
理论值	160	60	15	5	20	100	100
初 值	100	30	6	5	28	50	100
反演结果	160.1	59.1	15.1	4.8	20.8	92.9	95.7

4.2 用与实际观测点重合的 27 个点的理论垂直形变数据作反演试验

用现有的 27 个观测点上的数据(图 4)是否也能很有效地反演出震源参数呢?为此我们又做了下述试验。给定一组参数值,计算出与实际观测点重合的 27 个观测点的垂直位移,并加上标准偏差为 5mm 的随机误差,得到了垂直位移的“观测值”,用这些“观测值”进行反演。

为了探明各个参数的初值对反演结果的影响,我们做了 10 次试验。前 7 次固定 s_1, s_2 , 分别使其余 7 个参数中的一个参数的初值偏离理论值较远,而其它参数的初值偏离理论值不大,然后反演除了 s_1, s_2 以外的 7 个参数。做第 8 和第 9 次试验时也固定 s_1, s_2 ,但使其余 7 个参数的初值与理论值都偏离很大,然后再作反演。在第 10 次试验中使 s_1, s_2 也参加反演。所有试验的结果均示于表 2。由反演结果与理论垂直位移的曲线拟合来看,尽管初值偏离理论值较大,但曲线拟合得很好。这说明用 27 个观测点的垂直位移资料可以有效地反演 9 个震源参数。

从反演试验结果可以看出,断层半长度 L 和走滑错距 ΔU_s 的反演结果与理论值的偏差较

大。由观测点的空间分布看,测线基本上垂直穿过断层走向在地面上的迹线。观测点的这种分布对于断层半长度 L 和错距 ΔU 的约束较弱,导致 L 和 ΔU 的反演结果与“真值”偏差较大。当 s_1, s_2 也参加反演时,它们的初值对反演结果的影响很大。这是因为地面垂直位移场随着距 s_1, s_2 距离的变化很快地衰减,当 s_1, s_2 变化范围一旦超过垂直形变幅值较大的地区,观测点上的垂直位移对 s_1, s_2 的约束便明显地减弱了。因此,我们在做正式反演时借助其它资料对 s_1, s_2 作了约束。

表2 用与实际观测资料重合的27个点上的垂直形变资料进行反演试验

Table 2 Results of reverse computation by the vertical displacement data of 27 points coincided with the practical observations

模式参数	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$L(\text{km})$	$d(\text{km})$	$D(\text{km})$	$\Delta U_1(\text{cm})$	$\Delta U_2(\text{cm})$	$s_1(\text{km})$	$s_2(\text{km})$
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	110	35	12	1	25	20	170		
反演结果	147.6	39.9	12.4	3.1	20.3	8.3	150.6		
理论值	150	40	15	3	20	10	94.0*	94.0*	35.0
初值	140	20	12	1	25	20	170		
反演结果	153.0	39.5	10.9	1.9	20.4	26.9	156.0		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	140	35	25	1	25	20	170		
反演结果	163.4	40.5	11.0	2.9	20.9	50.0	151.3		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	140	35	12	7	25	20	170		
反演结果	147.6	39.9	12.4	3.1	20.3	8.3	150.6		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	140	35	12	1	32	20	170		
反演结果	152.0	39.5	11.0	1.9	20.4	24.7	155.8		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	140	35	12	1	25	50	170		
反演结果	147.6	39.9	12.4	3.1	20.3	8.3	150.6		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	140	35	12	1	25	20	240		
反演结果	147.6	39.9	12.4	3.1	20.3	8.3	150.6		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	110	25	30	6	25	50	200		
反演结果	148.1	39.9	12.4	3.1	20.3	9.5	150.6		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	110	25	30	6	25	50	250		
反演结果	151.8	42.4	20.5	-1.8	19.2	45.3	156.3		
理论值	150	40	15	3	20	10	150	94.0*	35.0*
初值	110	25	25	5	25	30	200	92.0	33.0
反演结果	161.4	41.0	12.4	1.1	19.5	49.1	146.8	95.7	33.1

*表示反演时该参数固定不变

4.3 走滑错距 ΔU_1 与倾滑错距 ΔU_2 的相对变化对反演结果的影响

为了更好地了解各种滑动方式对反演的影响,取五种典型的断层滑动方式进行了试验研究:①纯走滑,滑动角 $\lambda=0^{\circ}$ 和 180° ;②斜滑, $\lambda=30^{\circ}$ 和 210° ;③斜滑, $\lambda=45^{\circ}$ 和 225° ;④斜滑, $\lambda=60^{\circ}$ 和 240° ;⑤纯倾滑, $\lambda=90^{\circ}$ 和 270° 。试验结果列于表3。从表3可以看出,左旋滑动和右旋

滑动断层的各个参数通过反演可以得到较好的复原,滑动角 λ 也可以得到大致的复原。 ΔU_z 的复原情况比 ΔU_x 的差一些。

表 3 用与实际观测点重合的 27 个点的垂直位移“观测值”反演 5 种典型滑动方式断层的参数

Table 3 Parameters of 5 typical slip faults reversed by the vertical displacement “observations” of 27 points coincided with the practical points

模式参数	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$L(\text{km})$	$d(\text{km})$	$D(\text{km})$	$\Delta U_x(\text{cm})$	$\Delta U_z(\text{cm})$	$\lambda(^{\circ})$
理论值	150	40	15	3	20	100	0	0
初值	110	20	25	7	35	50	50	45
反演结果	146.7	41.7	14.7	7.8	20.0	93.7	0.0	0.6
理论值	150	40	15	3	20	-100	0	180
初值	110	20	25	7	35	-50	50	225
反演结果	150.4	28.5	10.6	4.2	28.0	-37.0	2.2	176.6
理论值	150	40	15	3	20	100	58	30
初值	110	20	25	7	35	50	10	11
反演结果	145.0	37.8	17.6	2.9	20.4	79.5	58.1	36.1
理论值	150	40	15	3	20	-100	-58	210
初值	110	20	25	7	35	-50	-20	202
反演结果	129.8	38.7	27.2	3.2	18.7	-14.1	-58.7	266.5
理论值	150	40	15	3	20	100	100	45
初值	130	25	25	6	30	60	60	45
反演结果	136.2	42.0	7.4	3.7	19.9	60.0	110.8	61.6
理论值	150	40	15	3	20	-100	-100	225
初值	130	20	25	6	30	-70	-140	244
反演结果	141.0	38.8	20.0	2.5	19.4	-60.4	-101.8	239.3
理论值	150	40	15	3	20	58	100	60
初值	120	30	25	7	30	30	60	63
反演结果	144.5	41.2	18.9	-1.6	19.2	64.6	105.7	58.6
理论值	150	40	15	3	20	-58	-100	240
初值	130	25	25	6	35	-10	-60	261
反演结果	143.7	39.5	21.8	3.1	19.7	-37.2	-99.4	259.5
理论值	150	40	15	3	20	0	100	90
初值	120	25	25	6	30	60	60	45
反演结果	153.4	41.7	20.4	-1.9	19.3	38.1	105.0	70.1
理论值	150	40	15	3	20	0	-100	270
初值	120	25	25	6	30	40	-70	240
反演结果	149.7	40.5	20.6	3.1	19.6	6.8	-100.3	266.1

5 共和地震的震源机制

5.1 反演结果

由前面的试验知道:用现有的 27 个点的资料可以有效地反演除 s_1, s_2 以外的 7 个参数;若 s_1 与 s_2 也参加反演,则因其初值对反演结果的影响较大,反演时宜根据其它有关资料对 s_1, s_2 加以适当的约束。从主震和余震震中分布(图 7)、等震线(图 8)和地形变的特征可以大致确定 (s_1, s_2) 在图 7 中的 O 点附近。取 s_1, s_2 的初值为: $s_1 = 94.0\text{km}, s_2 = 35.0\text{km}$ 。其它参数的初值取为 $\alpha = 150^\circ, \theta = 45^\circ, L = 20\text{km}, d = 3\text{km}, D = 20\text{km}, \Delta U_1 = -20\text{cm}, \Delta U_2 = -200\text{cm}$ 。通过反演,我们得到了如表 4 第 2 行所示的结果,其均方根残差 $\bar{r} = 14.2\text{mm}$ 。

考虑到 s_1, s_2 的初值对反演结果影响很大,我们以相当大的范围 $[s_1: 80(2)110\text{km}, s_2: 20(2)50\text{km}]$ 内各网格点的数值作为 s_1, s_2 的初值逐一进行反演。搜寻和反演结果表明,上述结果是目前最好的结果。

表 4 用实际观测资料反演的青海共和 $M_s 6.9$ 地震的震源机制

Table 4 Focal mechanism of Gonghe $M_s 6.9$ earthquake reversed by practical observational data

模式参数	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$L(\text{km})$	$d(\text{km})$	$D(\text{km})$	$\Delta U_1(\text{cm})$	$\Delta U_2(\text{cm})$	$s_1(\text{km})$	$s_2(\text{km})$
初 值	150	45	20	3	20	-20	-200	94.0	35.0
反演结果	102	46	20	5	14	5	-79	93.0	34.5
标准误差	3	2	1	1	1	22	16	0.4	0.3
试错结果	120	47.5	15	3	17	24.4	-52.2	94.2	29.5

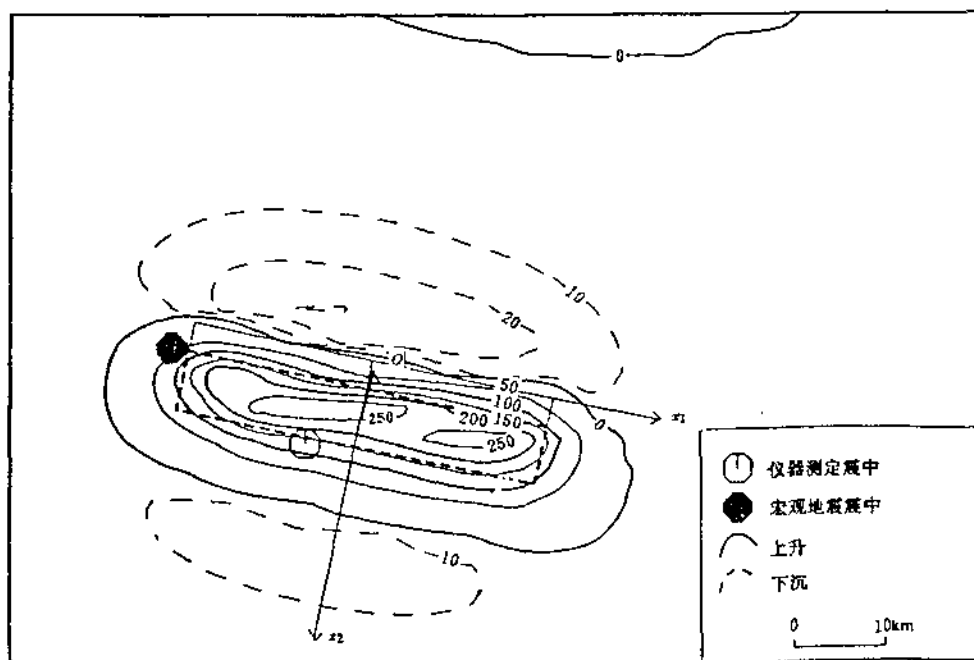


图 5 由反演得到的震源模式引起的理论垂直位移场

Fig. 5 Theoretical vertical displacement field caused by the inversed focal model

由反演的断层模式计算在 27 个观测点上引起的垂直位移的理论值,反演结果与观测值符

合得很好。用该断层模式计算的在包围主震和余震震中的 $105\text{km} \times 70\text{km}$ 范围内的垂直位移等值线如图5所示。

图6表示主震和余震震中、等震线以及反演断层在地面上投影的关系。可以看出主震和较大余震的震中主要分布在反演断层的地面投影附近,且其展布方向与断层走向大体一致。等震线和反演地震断层的投影也表明:极震区(IX度区)与VIII度等烈度最大的区域位于由反演得到的断层模式的地面投影区。这种反演地震断层与地震震中分布及等震线分布的一致性,支持了青海共和地震的发震构造是北西西向逆断层的推断。

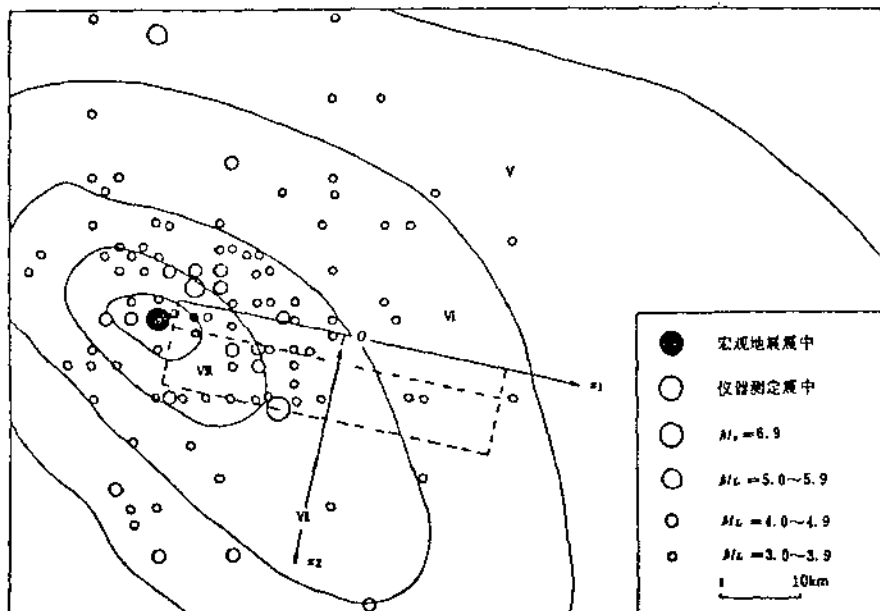


图6 主震与余震震中分布图和反演得到的地震断层在地面上的投影

Fig. 6 Epicentral location of major and post earthquakes and the projection of inversed fault on surface

表4最后一行列出用试错法计算的震源参数^[3]。根据这组模式参数和本文反演结果分别计算了27个观测点上的垂直位移的理论值与观测值。反演结果的均方根残差($\bar{r}=14.2\text{mm}$)比由试错法得到的结果的均方根残差($\bar{r}=21.1\text{mm}$)小得多,说明本文所给出的反演结果与观测结果符合得较好。

5.2 共和地震震源机制的特点

共和地震发生在共和盆地的西南边缘,位于祁连和秦岭—昆仑两大褶皱山系之间,北部青海南山断裂属于西域构造体系的南带,南部为秦岭—昆仑纬向构造带的北亚带,并有北北西向构造带(河西系)以隆拗变形的构造形式迭加其上(图1)。

共和盆地南缘北西向隐伏断裂,西起茶卡盐湖南侧,向东南大致沿着丘陵及洪积台地边缘,经哇玉香卡农场北侧、新哲农场南和塘格木农场盆地边缘,止于茫拉河谷一带,总体呈北西向展布,是一条陡倾角并向南西倾斜的逆冲断层。震区附近发育的北北西向次级隆凹带,展布在龙古塘—英德海—塘格木农场一线,早更新统湖相沉积沿此一线呈北北西向带状出露地表,没有中、晚更新统覆盖,是一条早更新世末以来形成并继续活动的构造带^[4]。两组活动构造在

塘格木农场附近交汇,造成该区域应力集中,我们通过形变资料的反演得到的关于这次地震是由北西西向的隐伏断层错动引起的结论与上述地质构造特点是一致的。

5.3 共和地震的其它一些震源参数

由文献[1],我们根据反演的震源参数,计算了地震矩、应力降、应变降、能量释放等参数(表5)。由表5可见,这是一个低应力降(3.8MPa)的板内地震,其应力降与板间地震的典型应力降(几个MPa)相当[5]。

表5 由反演得到的断层参数计算地震矩、应力降、应变降和能量释放

Table 5 Seismic moment, stress drop, strain drop and energy release computed by the inversed fault parameters

ΔU	S	M_0	$\Delta\sigma$	$\Delta\epsilon$	ΔE
(cm)	(km ²)	(10 ¹⁸ N·m)	(MPa)	(10 ⁻⁵)	(10 ¹⁴ J)
79	376	9.8	3.8	5.7	5

表中 ΔU 为平均错距, S 为断层面积, M_0 为地震矩, $\Delta\sigma$ 为应力降, $\Delta\epsilon$ 为应变降, ΔE 为能量释放。

6 讨 论

从本文和以前一些作者所作的研究来看,本文利用地形变垂直位移反演震源参数的方法是成功的。很明显,观测资料的质量直接影响了反演结果的质量。在本文结果中,虽说用沿水准测线的27个点的观测数据能够较好地反演震源机制,但反演时要求给出比较合适的 s_1, s_2 的初值,而且从反演试验可知,长度 L 和走滑错距 ΔU 的反演结果与真值偏差较大。由反演结果计算的地面垂直形变与观测值还有14.2mm的均方根残差。

用以反演的地面垂直形变资料是由1979年和1990年震后一个半月内两次测量的结果求得的,它实际上是震时变化、震后蠕动和可能发生的震前蠕动的综合结果。从震前到震后的11年中,震时错动以外的(震前与震后的)蠕动量究竟可能有多大呢?由地震波资料确定的地震矩 $M_0 = 8.0 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ [6],它是本文得的地震矩($9.8 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$)的4/5。由此不难得出可能的蠕动与总的错动的地震矩的比值大约是1/5。这个比值仅仅是由垂直形变资料反演得到的地震矩的相对误差(2/5)的1/2。由此可知,由目前的这些测定或反演结果,尚不足以区别出震前蠕动。在目前的测量误差范围内,可以认为地面垂直位移主要是由同震错动引起的。根据地震定位的结果可知,这次青海共和地震在主震发生前后各有一次较大的前震和余震,震后还有许多余震。这些地震对地面位移场都有影响。考虑到主震震级比前震和较大余震大1级多,可以认为地面上的永久位移主要是由主震引起的。反演得到的断层面解主要反映了主震的震源机制,而理论垂直形变与实测垂直形变的偏差,至少有一部分可以归因于这些前震和余震的影响。

在本文的工作过程中,曾经得到肖磊、李旭、李世愚、吴明熙、李肇仁、王培德以及强地面运动组其他同志的帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 陈运泰、林邦慧、林中洋、李志勇. 根据地面形变的观测研究1966年邢台地震的震源过程. 地球物理学报, 1975, 18, 164~

- 182.
- 2 陈运泰、林邦慧、王新华、黄立人、刘妙龙,用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式.地球物理学报,1979,22: 201~216.
 - 3 巩守文、王庆良、林继华.共和 6.9 级地震垂直形变场位错模式及其演化特征的研究.地震学报(待发表).
 - 4 曾秋生.一九九零年四月二十六日青海省共和、兴海间 6.9 级地震概况.高原地震,1990(2),3~12.
 - 5 Kanamori, H. and Anderson, D., Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull. Seism. Soc. Amer., 1975, 65, 1073~1095.
 - 6 Person, W. J., 1991, Seismological notes-March-April Bull. Seism. Soc. Amer., 1990, 81, 279~302

INVERSION OF FOCAL MECHANISM OF THE GONGHE EARTHQUAKE IN APRIL 26, 1990 USING LEVELING DATA

Zhao Ming and Chen Yuntai

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Gong Shouwen and Wang Qingliang

(No. 2 Crustal Deformation Monitoring Center, State Seismological Bureau)

Abstract

The focal mechanism of the Gonghe M_s 6.9 earthquake of Qinghai, China in April 26, 1990 is inverted using leveling data. It is obtained through inversion that this earthquake is caused by a mainly reverse dip-slipping fault. The fault strikes 102° , dips to SW and dip angle is 46° . The fault length and width are 40 and 9km respectively. The upper bound of the fault is 3km underneath the ground surface and the lower bound, 10km. The reverse dip-slip and the left-lateral strike-slip components of the dislocation are 79 and 5cm respectively. This is a low stress drop (3.8 MPa) intraplate earthquake, with strain drop estimated to be 5.7×10^{-5} . The seismic moment is $9.8 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$, and the energy release is $5.0 \times 10^{14} \text{J}$. This focal mechanism is generally consistent with overall distribution of isoseismals, aftershock seismicity and geometry of intersecting faults structure in the Gonghe basin.

Key words: focal mechanism, leveling survey, Gonghe earthquake, inversion, intraplate earthquake, Qinghai-Tibetan Plateau