

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

巩守文 王庆良 林继华^{**}

(中国西安 710054 国家地震局第二地形变监测中心)

摘要

共和 $M_s=6.9$ 地震垂直形变场位错模式初步研究结果表明, 该强震的发震构造为一位于共和盆地最新沉降中心附近、产状为 N 60°W / SW \angle 47°的隐伏逆断层, 其破裂面长度 30, 宽度 14 km, 沿断面方向的上、下界埋深分别为 3 和 17 km. 共和 6.9 级地震的最大同震、震前垂直形变量分别为 247 和 100 mm. 本文还对震区震后继续迅速隆起的原因进行了初步分析.

关键词 共和地震; 位错模式; 震前及同震垂直形变; 震后迅速隆起; 发震构造

1. 引言

1990 年 4 月 26 日青海共和 $M_s=6.9$ 地震有两个显著特点: 一是该强震的发震构造为共和盆地内部的隐伏断裂; 二是强震后震区仍表现为大面积迅速隆起. 本文的目的是通过对共和 $M_s=6.9$ 地震垂直形变场位错模式的研究, 确定发震断裂的性质和产状, 分离震前及同震垂直形变场, 并进一步分析震后震区迅速隆起的原因.

2. 断层位错在地表引起的垂直位移

设断层面为一矩形位错面长度为 $2L$, 宽度为 W . 取如图 1 所示的断层坐标系(x_1, x_2, x_3), 原点为断层面与地面交线的中点, x_1 轴沿断层走向, x_2 轴沿断面倾向, x_3 轴垂直向下. 设断层的走滑位错量为 ΔU_s (左旋为正, 右旋为负), 倾滑位错量为 ΔU_d (逆冲为负, 正断为正). 根据陈运泰等(1975)导出的走滑及倾滑情况下的三维垂直位移场表达式, 令 $x_3=0$, 常数 $\delta=1/2$, 则可得到当断层既有走滑又有倾滑时地表(平面)垂直位移的不定积分表达式:

* 国家地震局“八五”重点基金资助项目.

1991 年 12 月 1 日收到本文初稿, 1992 年 9 月 9 日决定采用.

** 现在地址中国福州 350003 福建省地震局.

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_3(x_1, x_2, 0) = & \frac{M_s}{12\pi} \left\{ \cos\theta [\ln(R + r_3 - \zeta) + (1 + 3\tan^2\theta)\ln(R - r_3 + \zeta)] \right. \\
 & - 3\tan\theta \ln(R + \zeta \sin\theta) + 6 \frac{r_2 \sin\theta}{R} - 2 \frac{r_2^2 \cos\theta}{R(R + r_3 - \zeta)} \\
 & + 4 \frac{r_2 r_3 \sin\theta}{R(R - r_3 + \zeta)} \} + \frac{M_d}{12\pi} \\
 & \times \left\{ 9 \sin\theta \operatorname{arctg} \frac{(x_1 - \zeta_1)(r_3 - \zeta)}{r_2 R} - 6 \frac{r_2 \zeta \sin\theta}{R(R + x_1 - \zeta_1)} \right. \\
 & \left. - 6 \sin\theta \operatorname{arctg} \frac{(x_1 - \zeta_1)(x_2 - \zeta \cos\theta)}{(h + \zeta \sin\theta)(R + h)} \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中, ζ, ζ_1 分别为沿断面宽度和长度方向的坐标; $r_2 = x_2 \sin\theta, r_3 = x_2 \cos\theta; R = \sqrt{(x_1 - \zeta_1)^2 + r_2^2 + (r_3 - \zeta)^2}; h = \sqrt{r_2^2 + (r_3 - \zeta)^2}$.

将(1)式代入沿断面长度和宽度方向的二重定积分计算公式, 可得断层错动在地表(平面)引起的垂直位移为

$$\bar{U}_3(x_1, x_2, 0) = [U_3(\zeta_1, \zeta)] = U_3(L, D) - U_3(L, d) - U_3(-L, D) + U_3(-L, d) \quad (2)$$

式中, d, D 分别代表沿断面宽度方向的断层上、下界埋深.

现另取一地理坐标系(y_1, y_2, y_3)其原点仍在地表, y_1 轴指向正北, y_2 轴指向正东, y_3 轴垂直向下. 设断层坐标系原点在地理坐标系中的坐标为($s_1, s_2, 0$), x_1 轴和 y_1 轴之间的夹角为 α (断层走向), 两坐标系之间的变换关系为

$$\begin{cases} x_1 = (y_1 - s_1) \cos\alpha + (y_2 - s_2) \sin\alpha \\ x_2 = -(y_1 - s_1) \sin\alpha + (y_2 - s_2) \cos\alpha \\ x_3 = y_3 \end{cases} \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式即可得地理坐标系下地面(平面)垂直位移的表达式 $\bar{U}_3(y_1, y_2, 0)$.

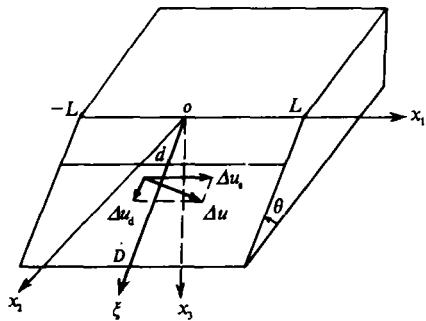


图 1 矩形断层位错模式

度高达 345 mm. 在隆起区的北侧为一相对下沉区. 由于是震后立即进行的复测, 因此可以认为该隆起主要是同震及可能的震前垂直形变共同叠加的结果.

为了分离震前及同震垂直形变场, 首先假设震前断层蠕动和同震错动具有继承性特点, 且发生于同一断层(面)段内. 基于上述假设, 我们可以首先利用 1978—1990.5 的垂直形变资料反演发震断层的综合位错参数, 然后根据地震波资料确定的共和 $M_s = 6.9$ 地震的地震矩资料, 分离同震及震前垂直形变.

3. 共和 6.9 级地震位错模式

1990 年 4 月 26 日共和 6.9 级地震之后, 国家地震局第二地形变监测中心于当年 5—6 月份对穿过震区的倒花、石塘两水准路线的复测结果表明, 从 1978 年至震后一个月的 12 年时间内, 在震区形成了一长轴 40 多公里, 短轴约 30 km 的北西西向高幅度隆起区(图 2, 起算点为西宁环 29 甲), 倒花 20 号水准点的隆起幅

由于实测水准资料较少, 又缺乏水平形变资料的配合, 本文采用试错方法反演发震断层的综合位错参数。

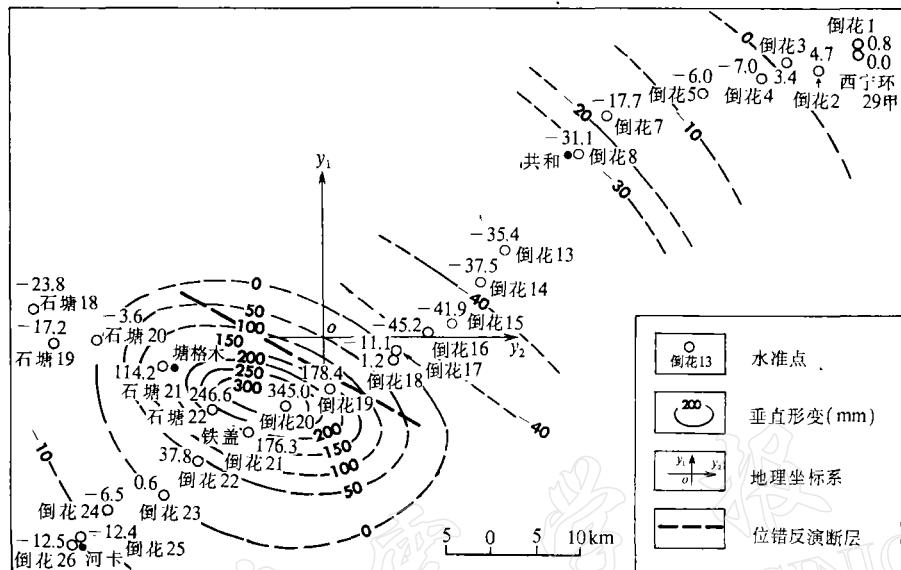


图 2 共和 $M_s=6.9$ 地震垂直形变图(1978—1990.5)

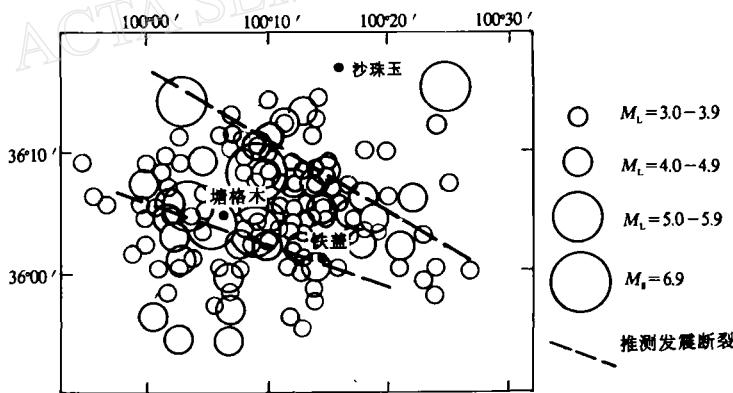


图 3 共和 $M_s=6.9$ 地震余震分布

通过综合分析共和 6.9 级地震的垂直形变资料(图 2)、余震分布资料(图 3)以及卫片解译资料(图 6)等, 并结合位错正演模型的分析计算, 将各位错参数的试错区间选择如下: $2L: 24-40 \text{ km}$; $d: 1-5 \text{ km}$; $D: 12-26 \text{ km}$; $\theta: 40-55^\circ$; $\Delta U_s: 0-500 \text{ mm}$, $\Delta U_d: -1000--500 \text{ mm}$; $s_1: -5.0-5.0 \text{ km}$; $s_2: -5.0-5.0 \text{ km}$; $\alpha: 100-130^\circ$; 地理坐标系的原点选在 $100^{\circ}18'E, 36^{\circ}06'N$ 处(图 2)。

对各组位错参数的试错结果分析表明, 以 $2L=30 \text{ km}$, $d=3 \text{ km}$, $D=17 \text{ km}$, $\theta=47^\circ$,

$\Delta U_s = 350 \text{ mm}$, (左旋), $\Delta U_d = -750 \text{ mm}$ (逆冲), $s_1 = s_2 = -2.5 \text{ km}$, $\alpha = 120^\circ$ (倾向 SW) 这组参数与实测资料符合较好.

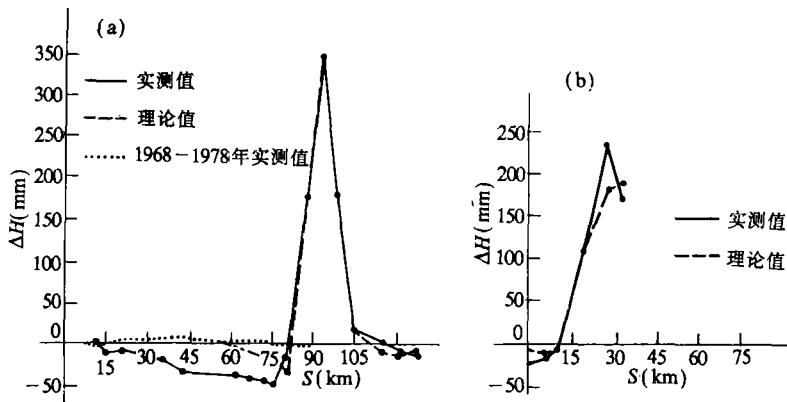


图 4 理论与实测垂直形变对比图

(a) 西宁环 29 甲—倒花 26; (b) 石塘 18—倒花 21

图 4 是根据上述位错参数得到的倒花(图 4a)、石塘(图 4b)两水准路线理论与实测垂直形变的对比图. 由图 4 可以看出, 理论值和实测值在隆起区内拟合还是比较好的, 下沉区误差较大, 可能与共和盆地相对于青海南山孕震期间的继承性下降有关. 总的来说可以认为, 上述位错模型基本上反映了共和 6.9 级地震的主要发震构造及其错动情况. 塘格木农场东南石塘 22 号水准点理论值与实测值偏差较大(61.4mm)的原因, 将在发震构造一节中予以讨论.

4. 同震及震前垂直形变

由位错参数定义的地震矩为

$$M = \mu \Delta U A \quad (4)$$

式中, μ 是介质的刚性系数, 一般取 $\mu = 3.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\Delta U = (\Delta U_s^2 + \Delta U_d^2)^{1/2}$, $A = 2L(D-d)$ 为断层破裂面总面积.

将共和 6.9 级地震的综合位错参数代入(4)式, 求得包括震前蠕动和同震错动在内的总地震矩为 $11.5 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$. 而由地震波资料确定的、主要反映共和 6.9 级地震同震错动效应的地震矩为 $8.0 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$ (Person, 1991). 两者的差值表明, 共和 6.9 级地震之前约发生了相当于地震矩为 $3.5 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的断层蠕动.

在同震错动与震前蠕动均发生于同一断层段内的假设下, 由位错参数确定的地震矩和地震波资料确定的地震矩可求得共和 6.9 级地震的同震位错量为 $\Delta U_s = 244 \text{ mm}$ (左旋), $\Delta U_d = -522 \text{ mm}$ (逆冲). 由此位错参数可进一步求得共和 6.9 级地震各水准点上的最大垂直形变量为 247 mm (倒花 20). 在实测值中扣除理论同震形变量, 可大致推算出共和 6.9 级地震之前震区存在一最大幅值约 100 mm (倒花 20) 的隆起区.

由倒花线 1968—1978 年的形变剖面(图 4a)可以肯定, 共和 6.9 级地震震前形变隆

起的时间不会早于 1978 年。另据与共和盆地相邻的祁连山地区的大面积及跨断层形变资料，该区域地壳应力场大范围迅速强化是从 1983 年开始的，由此可推测共和 6.9 级地震的震前形变积累也是从 1983 年左右开始的，即其孕震时间约为 7 年。

5. 共和 6.9 级地震震后垂直形变初析

国家地震局第二地形变监测中心于 1991 年 5—6 月份进行的震后第二期水准复测结果表明，共和老震区在原隆起的基础上，一年内又形成了一更大范围的迅速隆起区（图 5. 起算点仍为西宁环 29 甲），其中最大幅度为 63.5 mm（倒花 19）。

结合前面的位错反演结果，本文初步分析认为，共和 6.9 级地震震后异常迅速隆起的原因有如下几点：

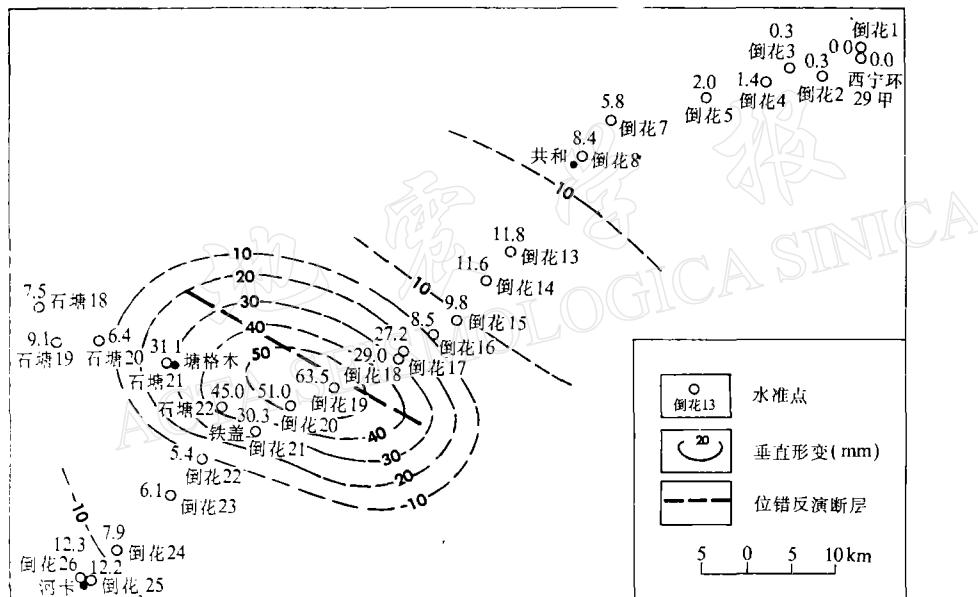


图 5 共和 6.9 级地震震后垂直形变图(1990.5—1991.5)

- (1) 震后断层摩擦系数的大大降低是震后异常迅速隆起的构造因素。
- (2) 震后异常迅速隆起部分是由于震时断层逆冲错动，而在断层上界（距地表垂直距离为 2.2 km）附近所积累的高应变能的迅速释放。
- (3) 震后震区应力场的迅速恢复可能是共和 6.9 级地震震后异常迅速隆起的主要力学因素。1991 年 11 月及 1992 年 6 月的进一步复测结果也证明了这一点。

有关共和 6.9 级地震的震后垂直形变演化过程及其机理，我们将进一步做深入的研究工作。

6. 共和 6.9 级地震发震构造

关于共和 6.9 级地震的发震构造问题，由于没有可靠的断层露头或地震构造裂缝带，

一直争议较大。目前大多数人的观点认为，共和 6.9 级地震的发震构造为经哇玉香卡农场、塘格木农场南侧一直到黄河茫拉河谷的盆地南缘近北西向断裂（曾秋生，1990）；也有人认为是北北西断裂发震（邬树学，1990）；向光中推测为东西向隐伏断层发震*。

本文根据垂直形变错模型研究所确定的共和 6.9 级地震的发震主构造为一位于塘格木与沙珠玉河之间、走向 N 60° W、倾向 SW 的隐伏逆断层（图 2）。邬敬敞对共和盆地 1:1 000 000 卫星照片的解译结果*也反映出，沿共和盆地最新沉降中心，从茶卡盐湖、经英得海与更尕海一带一直穿过黄河存在一影像清晰的线性构造 F_1 （图 6），与位错模型反演确定的发震断裂基本吻合。此外，最高隆起点由图 2 中的倒花 20 号点向北转移至震后的倒花 19 号点（图 5）也进一步反映了该发震断层的震后向上蠕动。

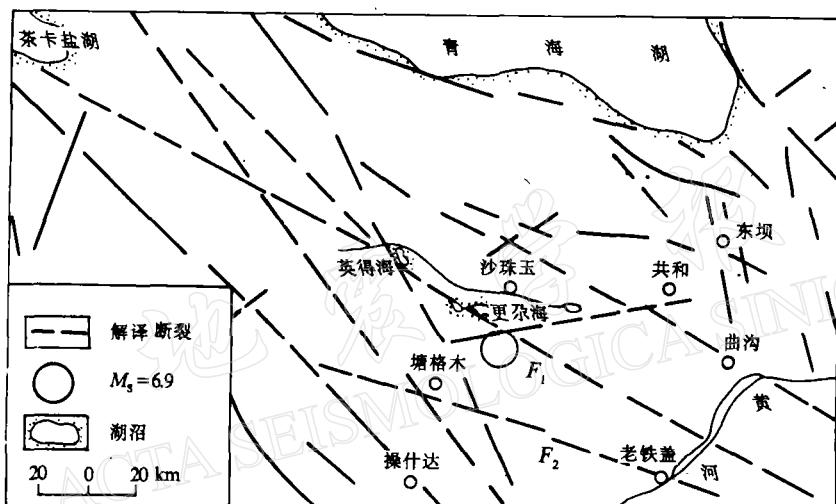


图 6 共和地区卫片线性构造解译图(据邬敬敞)

值得说明的是，由余震分布图（图 3）和卫片解译图（图 6）可以看出，自塘格木南经铁盖到黄河岸边的老铁盖存在一条近东西向的隐伏构造 F_2 （图 6），在该构造上中强地震比较集中，推测该次级发震断裂 F_2 的活动可能是塘格木农场东南石塘 22 号水准点理论值与实测值误差较大的原因之一。

7. 结 论

- (1) 共和 6.9 级地震的发震构造为一位于塘格木与沙珠玉河之间、走向 N60°W，倾向 SW、倾角 47° 的隐伏逆冲断层。
- (2) 共和 6.9 级地震同震最大垂直形变量为 247 mm；最大震前垂直形变量约 100 mm，且主要形成于 1983—1990 年期间。
- (3) 共和 6.9 级地震震后震区异常迅速隆起的原因在于震后断层摩擦系数的大大降低和震区应力场的迅速恢复，以及震时断层逆冲错动而在断层上界附近所积累的高应变

* 兰州地震研究所，1990. 1990 年 4 月 26 日青海省海南藏族自治州塘格木 6.9 级地震考察报告。

能的大量释放.

因时间仓促,本文仅利用单一矩形均匀位错模型,用试错法对共和 6.9 级地震的垂直形变场和发震构造进行了初步研究,理论值与实测值在下沉区和隆起区个别点上还存在不很小的误差. 在今后的研究中将进一步完善位错模型和方法,并进一步深入定量地研究共和 6.9 级地震震后垂直形变的演化过程和力学机理.

本研究得到陈运泰教授的热心指导. 唐传芬、凌晔同志参加了有关水准资料的处理工作. 陈兵参加了前期的部分计算工作,在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 陈运泰、林邦慧、林中洋、李志勇, 1975. 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, 18, 164—182.
- 曾秋生, 1990. 1990 年 4 月 26 日青海省共和、兴海间 6.9 级地震概况·高原地震, 2, 3, 3—11.
- 邬树学, 1990. 有关塘格木地震构造的一些问题(摘要). 高原地震, 2, 3, 13—14.
- Person ,W. J. ,1991. Seismological notes —— March-April 1990. *Bull. Seism. Soc. , Amer.* , 81, 297—302.