

利用 P 波、S 波初动和振幅比计算 2000 年 姚安 M_s 6.5 地震序列震源机制解^{*}

刘丽芳, 毛慧玲, 苏有锦, 秦嘉政

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用 P 波、SV 波和 SH 波的初动和振幅比计算了 2000 年姚安 6.5 级地震序列中 14 次 $M \geq 3.0$ 地震的震源机制解。结果表明, 姚安 6.5 级地震的主要发震断裂走向为北西, 高倾角, 在北北西向近水平主压应力作用下, 呈现出以右旋走滑为主的断层错动性质; 姚安地震序列以走滑型为主, 个别地震为斜滑型, 是在北北西向水平或近水平的主压应力作用下的构造运动方式; 主震发生后 1~3 天断层错动以走滑型为主, 个别为斜滑型, 主震发生后 3~30 天断层错动为走滑型; P 轴和 T 轴的方位总在按与构造应力场走向由一致到不一致再到一致的规律反复变化; 在强余震明显活动期间, 地震以水平或近水平向主压应力作用下的断层错动方式为主, 有一定的斜向作用, 然后为水平或近水平的主压应力作用方式, 主震后应力场有明显的调整变化过程。

关键词: 初动; 振幅比; 震源机制解; 姚安地震

中图分类号: P315.3⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2009)01-0025-06

0 引言

一个地震序列中, 各次地震的震源机制解与震源位置分布共同反映了地震的破裂过程, 是研究地震发生条件和发生环境的重要依据。传统的震源机制一般用初动方法求解。如果地震比较小, 台站密度低, 中小地震的震源机制就难以确定。在求解震源机制的时候, 为了约束地震波节平面的空间位置, 最好要有紧靠节面位置的初动观测数据。由于 P 波辐射花样的固有特征, 愈靠近节面, P 波越弱, 初动方向越不易辨认。而 SH 波辐射花样与此相反, 在节面附近最强。因此, 与仅用 P 波初动相比, 充分利用三分量地震波资料能够得到更好的震源机制解。

随着我国数字地震台网建设逐步完成, 获取高质量的三分量地震记录已经成为可能。与 SV 波相比, SH 波不存在出射角大于临界角时在自由表面的反射 P 波产生的虚部震相所引起的问题, 因此 SH 波的初动和振幅更易精确获得。Kisslinger 等 (1981) 提出利用短周期 P-S 波振幅比确定震源机制的方法; Snodgrass 等 (1984, 1989) 发展了利用 P 波、SV 波、SH 波和振幅比联合求解震源机制的

方法; 刘杰等 (2004) 运用 Snodgrass 的震源机制求解方法, 利用区域数字地震台网资料计算了中小地震的震源机制解, 并与利用 P 波初动求得的结果进行了对比。

本文中, 我们运用 Snodgrass 开发的震源机制解程序, 利用云南区域数字地震台网和 2000 年姚安地震后布设的小孔径流动数字地震台网记录的数字地震波形资料, 计算了 2000 年姚安 6.5 级地震序列中 14 次 $M \geq 3.0$ 地震的震源机制解, 分析了强震发生后震源机制及应力场的变化特征。

1 计算方法与步骤

在 $r\theta\phi$ 坐标系中, 双力偶震源辐射的远场地震波位移在观测点 $P(r\theta\phi)$ 处的分量为

$$u = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{1}{V_p} \frac{1}{r} \dot{M} \left(t - \frac{r}{V_p} \right) \sin^2\theta \cdot \sin 2\phi,$$

$$v = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{1}{V_s} \frac{1}{r} \dot{M} \left(t - \frac{r}{V_s} \right) \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot \sin 2\phi,$$

$$w = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{1}{V_s} \frac{1}{r} \dot{M} \left(t - \frac{r}{V_s} \right) \sin\theta \cdot \cos 2\phi.$$

^{*} 收稿日期: 2007-11-12

基金项目: 西南构造区强震预测预警技术和指标 (2006BA01B03-04-01) 及云南省重点项目“云南强震活动与动力学研究”联合资助。

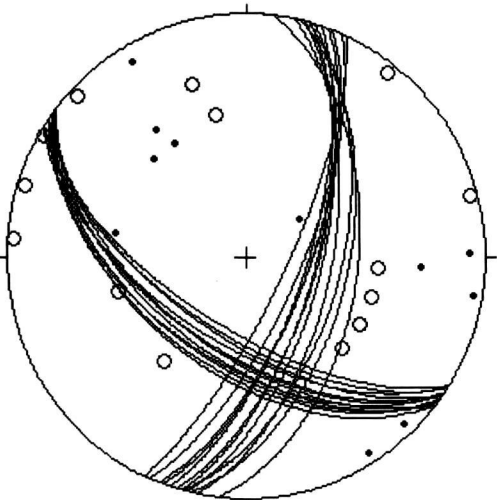


图 2 2000 年 1 月 16 日姚安 $M_L3.4$ 地震震源机制解图 (点表示 P 波初动向上, 圈表示 P 波初动向下)

依照上述步骤, 得到姚安 6.5 级地震序列的 14 次 $M \geq 3.0$ 地震的震源机制结果 (表 1 图 3)。

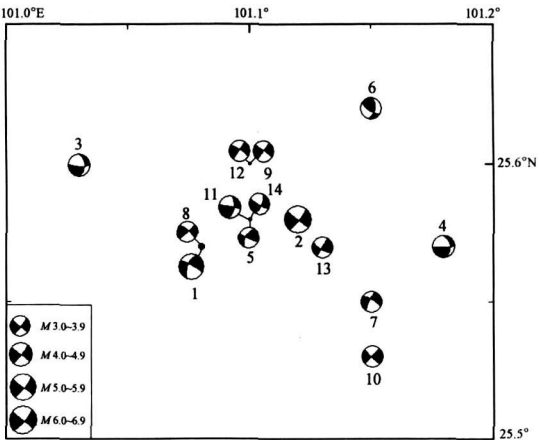


图 3 2000 年姚安 6.5 级地震序列 14 个地震震源机制解分布图

表 1 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震序列余震震源机制解

序号	发震时间		震中位置		震级	深度 /km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴	
	年-月-日	时:分:秒	北纬 / (°)	东经 / (°)			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位 / (°)	仰角 / (°)	方位 / (°)	仰角 / (°)	方位 / (°)	仰角 / (°)
1	2000-01-15	06:09:01	25.57	101.08	5.9	30	298	78	-152	202	63	-14	163	28	67	10	112	27
2	2000-01-15	07:37:05	25.58	101.12	6.5	30	129	88	-170	38	80	-2	354	8	263	6	308	10
3	2000-01-15	09:03:42	25.50	101.03	4.1	15	95	79	-136	355	47	-15	325	38	218	21	265	43
4	2000-01-15	09:39:07	25.57	101.08	4.1	30	88	86	-130	354	40	-6	324	36	210	30	264	50
5	2000-01-15	14:54:11	25.58	101.10	3.5	30	113	83	151	207	61	9	163	14	66	26	117	29
6	2000-01-16	12:00:22	25.62	101.15	3.4	11	14	55	150	122	66	39	245	7	342	44	32	24
7	2000-01-18	11:53:14	25.55	101.15	3.7	30	301	71	-163	205	74	-20	162	25	253	2	115	16
8	2000-01-19	15:18:38	25.57	101.08	3.3	10	313	75	-179	223	89	-15	177	11	269	10	133	1
9	2000-01-20	01:59:34	25.60	101.10	3.9	15	305	85	178	35	88	5	170	2	260	5	305	2
10	2000-01-20	16:59:40	25.53	101.15	3.1	10	134	81	176	225	86	9	359	3	90	9	135	4
11	2000-01-23	08:21:21	25.58	101.10	4.3	9	279	85	150	12	61	6	329	17	231	24	282	30
12	2000-02-01	07:13:51	25.60	101.10	3.0	10	303	80	-179	213	89	-10	167	8	258	6	123	1
13	2000-02-01	15:04:09	25.57	101.13	3.7	17	121	70	178	211	88	20	344	13	78	15	121	2
14	2000-02-06	18:44:53	25.58	101.10	3.5	12	116	80	-163	22	73	-10	340	19	248	5	292	17

3 震源机制特征

3.1 空间特征

姚安震中附近地表并未见规模较大的断裂构造, 但震区北部可能存在一条与通海 牟定断裂相连的 N 向隐伏断裂, 而南侧的南华一带也存在一条与建水 楚雄断裂相连的 NW 向隐伏断裂带。震区及区内 NW 向的马尾箐断裂带恰好位于这两条隐伏断裂所夹的地带 (毛玉平和万登堡, 2001; 秦嘉政等, 2003)。该断裂发育于中生界—新生

界, 断错的最新地层为古地新统, 是由 3 条呈右阶雁行排列的断层组成的断裂带, 走向 $N40^{\circ} \sim 60^{\circ} E$ 倾向 NE 或 SW, 倾角 $45^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。由表 1 和图 3 可知, 姚安 6.5 级地震的节面 I 走向为 129° , 倾角为 88° , 滑动角为 -170° ; 节面 II 走向为 38° , 倾角为 80° , 滑动角为 -2° ; P 轴方位为 354° , 仰角为 8° ; T 轴方位为 263° , 仰角为 6° , 表明姚安 6.5 级地震的主要发震断裂走向为 NW 高倾角, 在 NNW 向水平主压应力作用下, 具有以右旋走滑为主的错动性质, 马尾箐断裂是姚安 $M_s6.5$ 地震的发震构造。

姚安震区地处川滇菱形块体中南部，属扬子准地台川滇台背斜内的滇中台陷，位于由程海断裂、红河断裂和元谋断裂围限而成的滇中块体内部。块体内部和边界的地震以走滑为主（吴建平等，2004），P轴优势分布方向为NNW—SSE向（毛玉平和韩新民，2006），还有一组为NE向（刘祖荫等，2002）。图4是姚安地震序列14个地震震源机制各个参数每10°间隔的归一化频数分布。因无法区分两个节面中哪个是断层面，可以对这两个节面的参数合并统计计算。图4中节面走向在NW向和NE向聚集了两组相互正交的优势取向，节面倾角主要为大于60°的高倾角，直立或接近直立的节面占大多数。节面以走滑为主，有个别地震为斜滑型，走滑型占86%，斜滑型占14%，3个参数的优势分布构成了两组走向为NW—SE和NE—SW相互正交、近于直立的节面，且以走滑为主；主压应力P轴方位NNW向优势分布明显，张应力T轴方位以NEE向优势分布明显，P轴和T轴都以水平或近水平作用的仰角占优势；中等应力轴方位NW向优势分布明显，N轴仰角为0°~50°，表明姚安地震序列构造应力场呈现出NNW向水平或近水平主压应力作用下的走滑错动构造运动方式，与川滇菱形块体的构造应力场特征一致，并且大多数余震构造应力场与主震发震应力场一致。

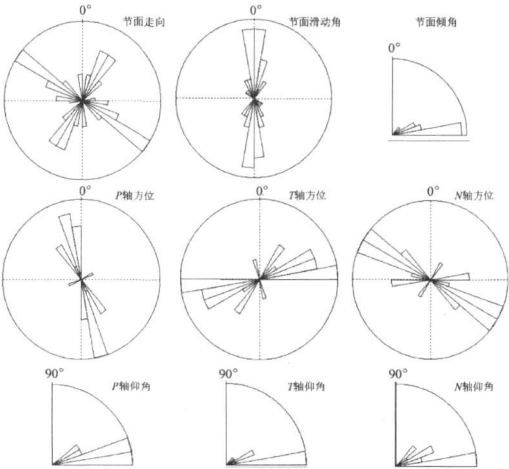


图4 震源机制各个参数每10°间隔的归一化频数分布

3.2 时间特征

强震前后震源区内的中小地震震源机制解的变化，有助于了解震源孕育的力学过程。通常岩体内断层的活动类型主要有走滑、斜滑、逆断层和正断层等，它们取决于介质性质、区域作用力

的方向、断面的产状及力学性质等因素。实际上，大多数断层的活动往往表现为复合型。本文中，我们要研究姚安6.5级强震后震源区是否存在断裂类型和构造应力场的变化。

(1) 节面倾角随时间分布

图5给出了节面倾角随时间变化的情况。节面和节面Ⅱ主要为接近直立的高倾角（60°<θ≤90°），其中节面Ⅰ为13次，占93%；节面Ⅱ为12次，占86%；个别地震为倾斜型的中等倾角（30°<θ≤60°），其中节面Ⅰ为1次，节面Ⅱ为2次。由图可见，主震发生后1~3天断层错动以走滑型为主，兼有个别斜滑型地震；而主震发生后3~30天M≥3.0地震的断层错动为走滑型。

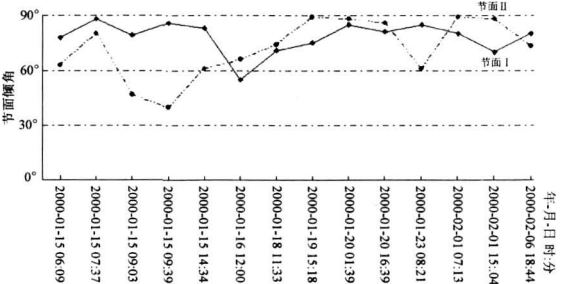


图5 节面倾角随时间变化

(2) 节面滑动角随时间变化

我们取滑动角为0°~±30°和±150°~±180°的节面为走向滑动，取±31°~±60°和±121°~±150°的节面为斜向滑动，其余为倾滑。图6给出了节面滑动角随时间变化的情况。节面Ⅰ在6.5级地震后当天有2次地震的滑动角为-130°和-136°，节面Ⅱ在主震后第2天有1次地震的滑动角为39°，为斜滑型。

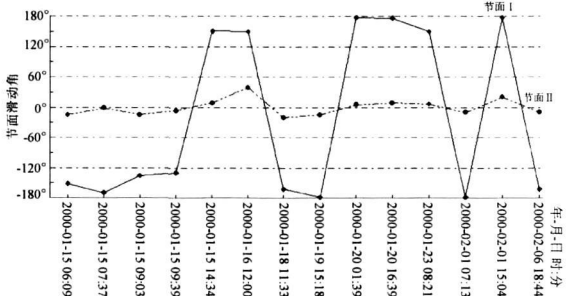


图6 节面滑动角随时间变化

(3) P轴和T轴方位随时间变化

中小地震震源应力轴的取向反映了震源所在区域的构造应力方向，因此，通过监视中小地震

应力轴的取向, 可在一定程度上达到监视区域应力场的目的。图 7 给出了姚安地震序列 P 轴和 T 轴方位随时间变化的情况, 可以看出 P 轴和 T 轴方位总是按与构造应力场走向一致到不一致再到一致的过程调整变化。

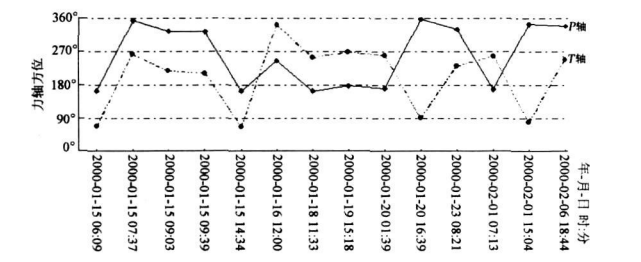


图 7 P 轴和 T 轴方位随时间变化

(4) P 轴和 T 轴仰角随时间变化

图 8 给出了 P 轴和 T 轴仰角随时间变化情况。由图可见, 1 月 15 日发生的 2 次 4 级强余震的 P 轴仰角分别为 37.76° 、 35.93° , 其余 12 次地震的仰角均在 30° 以内; 1 月 16 日发生的 3.4 级余震的 T 轴仰角为 44° , 其余 13 次地震的仰角均在 30° 以内, 表明余震以水平或近水平向主压应力作用下的断层错动方式为主, 有一定的斜向作用。由表 1 可见, 姚安主震前发生了 1 次 5.9 级地震, 主震后发生了 3 次 4 级地震, 有 1 次发生在主震后第 8 天, 其余发生在主震当天, 主震发生前后的应力场有明显的变化。

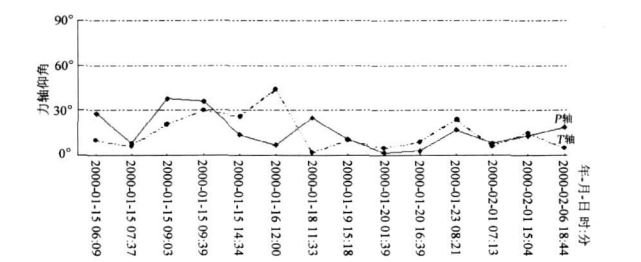


图 8 P 轴和 T 轴仰角随时间变化

4 结论

(1) 姚安 6.5 级地震的主要发震断裂走向为 NW 向, 高倾角, 在 NNW 向水平主压应力作用下,

具有以右旋走滑为主的断层错动性质。

(2) 姚安地震序列中的 14 个地震, 走滑型占 86%, 斜滑型占 14%, 节面倾角主要为大于 60° 的接近直立高倾角; 构造应力场为 NNW 向, 呈现出水平或近水平主压应力作用下右旋走滑错动的构造运动方式, 与川滇菱形块体的构造应力场特征一致; 大多数余震构造应力场与主震发震应力场一致。

(3) 姚安 6.5 级地震序列节面倾角和滑动角随时间的变化表明, 主震后 1~3 天断层错动以走滑型为主, 兼有个别斜滑型, 主震发生后 3~30 天 $M \geq 3.0$ 地震的断层错动为走滑型。

(4) 姚安 6.5 级地震序列 P 轴和 T 轴的方位总是按与构造应力场走向一致到不一致再到一致的规律反复变化。在强余震明显活动期间, 地震以水平或近水平向主压应力作用下的断层错动方式为主, 有一定的斜向作用, 然后为接近水平的主压应力作用方式。

参考文献:

刘杰, 郑斯华, 康英, 等. 2004. 利用 P 波和 S 波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解 [J]. 地震, 24 (1): 19—26.

刘祖荫, 苏有锦, 秦嘉政, 等. 2002. 20 世纪云南地震活动 [M]. 北京: 地震科技出版社.

毛玉平, 韩新民. 2006. 云南地区强震 ($M \geq 6$ 级) 研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社.

毛玉平, 万登堡. 2001. 2000 年云南姚安 6.5 级地震 [M]. 昆明: 云南科技出版社.

秦嘉政, 叶建庆, 钱晓东, 等. 2003. 2000 年姚安地震的震源参数 [J]. 地球物理学报, 46 (5): 633—641.

吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2004. 云南地区中小地震震源机制及构造应力场研究 [J]. 地震学报, 26 (5): 457—465.

Kisslinger C, Bowman J R, Koch K. 1981. Procedures for computing focal mechanisms from local (SV/P)_Z data [J]. BSSA, 87 (6): 1719—1730.

Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, et al. 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV2P amplitude ratio data [J]. Earthquake Notes, 55 (3): 15.

Snoke J A. 1989. Earthquake mechanism [Q] // James D E. Encyclopedia of Geophysics New York: Van Nostrand Reinhold Company, 239—245.

Detem in ing Foca lMechanism Solution of the2000 Yao'an M_s6. 5
Earthquake Sequence Using the FirstMotion
and Amplitude Ratio of P and S wave

LIU Li-fang MAO Hui-lin SU You-jin QIN Jia-zheng

(Earthquake Administration of Yunnan Province Kuming 650224 Yunnan China)

Abstract

We calculate the focal mechanisms of 14 earthquakes with $M \geq 3.0$ of the 2000 Yao'an $M_s 6.5$ earthquake sequence using the first motions of P, SV and SH waves and their amplitude ratios. The main seismogenic fault of the Yao'an earthquake trends in NW and has high dip angle, showing the feature of right lateral strike slip under nearly horizontal main pressure stress. The focal faults of the Yao'an earthquake sequence mainly move by strike slip with sporadic oblique slip faulting under horizontal or nearly horizontal main pressure stress, and in 1—3 days after the main shock, the fault slips by the way above mentioned, but in 3—30 days after the main shock by the way of strike slip. The azimuth of P axis and T axis changes with the direction of structural stress field regularly from consistently to inconsistently again to consistently. During the activity of strong aftershocks, the faults move mainly under horizontal or nearly horizontal main pressure stress, with certain oblique. The stress field shows obvious adjustment process after the main shock.

Key words: first motion, amplitude ratio, focal mechanism solution, Yao'an earthquake