

宁洱地震序列的震源机制解分析^{*}

付 虹, 王绍晋, 龙晓帆, 刘丽芳, 邬成栋

(云南省地震局, 昆明 650041)

摘要: 利用云南数字地震台网资料得到宁洱地震序列的主震、5.1 级强余震和 52 个余震震源机制解。分析表明, 该地震序列的发震断裂呈 NW 走向, 倾角陡立。在接近水平的近南北向压应力作用下, 断裂具有右旋走滑的错动性质。主震、强余震和众多的余震都发生在同一发震断裂上。大量的余震震源机制解结果与主震一致, 是地震序列的主要破裂类型, 但还存在与主要类型不一致的倾向滑动类型, 这可能与余震破裂起始点的微构造控制作用有关, 但是它们呈水平向的应力轴与主震的主应力轴一致。NW 向断层作右旋走向错动, 滑动断层推挤的象限都是逆冲类型的余震, 而拉张的象限都是正断层类型的地震。宁洱地震序列的震源机制和周围 4 次 5 级以上地震的震源机制相同, 表明震源区应力场和区域应力场完全一致, 宁洱地震的孕育和发生受区域应力场的控制。

关键词: 震源机制解; 宁洱地震序列; 应力场

中图分类号: P315.3⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2009)03-0253-05

0 引言

2007 年 6 月 3 日 05 时 34 分, 云南省宁洱县发生 $M_s 6.4$ 地震。地震所属的思茅—宁洱地区, 5、6 级中强地震频繁发生。自 1884 年有地震记载以来, 至 2007 年 11 月, 该地区共发生 5.0 ~ 5.9 级地震 21 次, 6.0 ~ 6.9 级地震 13 次, 其中以 1979 年 3 月 15 日普洱磨黑 6.8 级地震最强。思茅—宁洱地区在地质构造上属 NNW 向无量山断裂带, 并且表现为由晚更新世以来活动的 NNW 向断裂与 NE—NEE 向断裂彼此交切形成的类棋盘格式块体构造形式 (虢顺民等, 1999), 呈现出复杂的地质构造展布格局。NNW 向断裂为右旋错动, NEE 向断裂为左旋错动, 局部兼有正断层分量, 6 级强震均发生在这两组断裂上。思茅—宁洱地区属现代构造应力场空间分布的滇西南块断带 (阚荣举等, 1977; 王绍晋等, 1989), 其现代构造应力场主压应力优势方向为 SSE, 同时还可能受到来自相邻西侧构造块体的 NNE—NE 向压应力的作用, 成为应力场空间分布较为复杂的区域。由断层滑动资料反演构造应力张量和由震源机制解资料求解的平均应力场结果显示, 镇沅—营盘山断裂以西至龙陵断裂带以南地区, 现代构造应力场的最大主压应力方向为 NNE, 反映出

思茅—宁洱地区区域构造应力场的复杂性特征 (谢富仁等, 2001)。

此次宁洱 $M_s 6.4$ 地震是继 1993 年 1 月 27 日宁洱 $M_s 6.3$ 地震 14 年后, 思茅—宁洱地区发生的又一次 6 级强震。毋庸置疑, 对此次强震及其序列的分析研究, 有助于人们对思茅—宁洱地区地震构造、发震机理、地震成因乃至地震监视预测有更深入的认识。

1 主震和强余震的震源机制解

震源机制解可以反映震源的力学和动力学特征, 是对强震序列震源和震区应力场、震源破裂过程以及发震构造进行深入研究的重要基础资料。地震序列中, 包括主震和余震在内的每一个地震都表现出自身的特点, 反映出序列发展过程中某一特定时刻、某一特定位置的震源特征信息。每一个地震的震源机制解既反映了个体的特征, 又是序列整体特征中不可或缺的部分。通过分析了解序列发展过程中各个时段地震的震源特征信息, 可以从整体上了解强震序列的震源破裂过程和震源应力场时空特征。

笔者利用昆明数字地震台网记录到的清晰可靠的 P 波初动符号, 采用初动符号格点尝试法求解得到主震和 $M_s 5.1$ 最大余震的震源机制解, 结

* 收稿日期: 2008-03-03.

基金项目: 云南省人才办 (2006PY01-39) 和中国地震局 2009 年度震情跟踪合同制工作 2009010105 项目共同资助。

果分别见表 1 和图 1。表 1 中还给出了美国地质调查局 (USGS) 的矩张量解和哈佛大学的矩心矩张量解参数。由表 1 可以看出, 主震的 3 个结果都比较相似, 而哈佛大学的矩心矩张量解与本文的结果更为接近。主震发震应力场为近 SN 向, 压应力以水平作用为主, NW 向节面以右旋走滑 错动为

主。M_{5.1} 余震结果与主震相似, 由 P 波初动求得的结果是 NW 向节面倾滑分量较大。依据此次地震宏观烈度最内等震线长轴方向及序列震中优势分布方向等, 推断此次地震的发震断裂是 NW 向破裂面, 在 NNE 向以水平作用为主的压应力作用下, 以右旋走滑为主。

表 1 宁洱 6.4 级主震和 5.1 级余震震源机制解
Tab 1 Focal mechanism of the main shock and the aftershocks

地震	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		精度	备注
	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 /(°)		
主震	140	86	175	232	86	24	4	14	99	20	242	65	A	本文格点尝试法结果 USGS 矩张量解 哈佛大学矩心矩张量解
	138	57	140	252	58	40	15	0	105	50	285	40		
	146	63	156	247	69	29	15	4	108	35	280	54		
余震	148	32	157	250	83	59	5	31	129	43	254	31	B	本文格点尝试法结果 哈佛大学矩心矩张量解 本文振幅比解
	147	80	169	238	79	10	193	1	102	15	285	75		
	157	79	157	12	67	62	201	24	108	8	0	64		

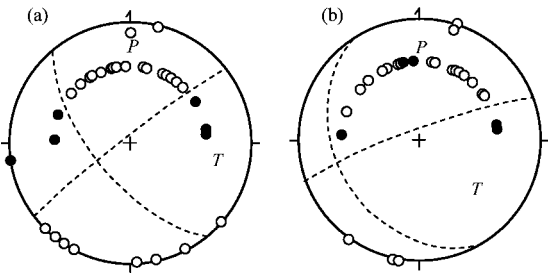


图 1 用 P 波初动求得的 M_{6.4} 主震 (a) 和 M_{5.1} 最大余震 (b) 震源机制解
Fig 1 Focal mechanism of M_{6.4} main shock (a) and M_{5.1} aftershock (b) by P-wave first motion

2 中小余震震源机制解

致力于中小地震震源机制解研究的地震学家, 给出了多种小震震源机制的求解方法。20 世纪 80 年代初, Kisslinger 等 (1981) 提出利用 P 波和 SV 波振幅比资料, 采用地壳均匀介质模型, 以射线出射角分布作介质非均匀校正情况下测定小震震源参数的方法。之后, 梁尚鸿等 (1984) 以点源位错震源模型, 采用层状介质中地震体波广义透射系数的快速算法, 由计算 P 波和 S 波综合地震图得到最大振幅, 然后通过最大振幅比值与观测资料拟合的方式来测定震源机制解参数。许忠淮 (1979)、华祥文 (1989) 在区域构造基本一致的情况下, 用更多的分散的中小地震联合计算区域小震综合节面解。Snook (1989) 也一直致力于用

P 波、SV 波、SH 波的初动和振幅比联合计算震源机制解的研究, 并于 2001 年在 IASPE 百年计划的时候将计算程序向全球作了推广, 这使利用区域地震台网的资料来测定大量小地震的震源机制解成为了现实。

本文中笔者采用梁尚鸿等 (1984) 的方法求解宁洱地震的中小余震序列的震源机制。经计算共得到 2007 年 6 月 3 日至 11 月 15 日地震序列中共 52 个 M_{2.8}~4.3 余震的震源机制解。依据各震源机制解彼此之间的亲疏关系, 笔者把这 54 个地震的震源机制解分为若干类, 得到的同一类解, 采用许忠淮 (1979) 提供的格点尝试计算软件, 计算出平均机制解, 同时给出最低矛盾比加 5% 的全部 P T B 轴投影, 以便考查平均解的质量。54 个解被分为 3 类, 走向滑动类型和主震基本一致的有 31 个解, 占 57.4%, 超过一半; 正断层类型有 17 个解, 占 31.5%, 接近 1/3; 逆冲断层类型有 6 个解, 占 11.1%, 数目最少。

第一类解包含的地震最多, 包括 6.4 级主震和 5.1 级余震。地震为走滑类型。此类平均震源机制解节面 I 走向为 129°, 倾角为 77°, 滑动角为 175°, 属于右旋走向滑动错动性质; 节面 II 走向为 221°, 倾角为 86°, 滑动角为 13°, 属于左旋走向滑动错动性质; 主压应力 P 轴方位为 354°, 仰角为 6°, 呈水平状态。主张应力 T 轴方位 86°, 仰角 12°, 也呈水平状态。中等应力轴 B 直立。图 2^a是其图解。此类平均机制解最低矛盾比仅为 5%, 再

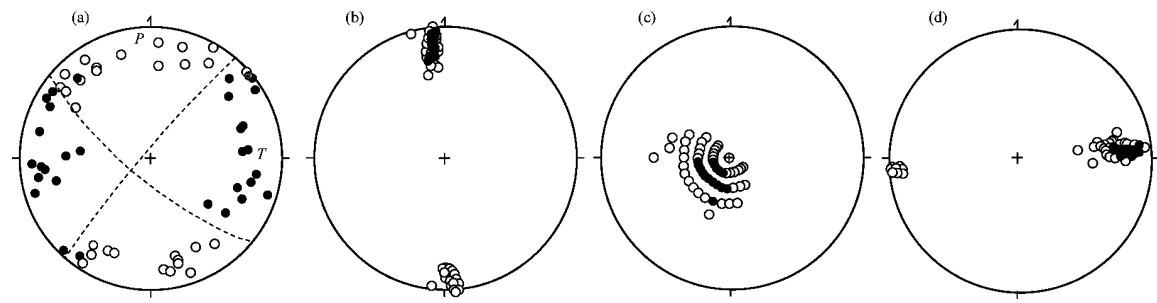


图 2 走向滑动类型震源机制的平均解 (a) 和应力 P 轴 (b)、B 轴 (c) 和 T 轴 (d) 的轴角域分布
Fig. 2 Average solution of strike-slip focal mechanism (a) and distribution of stress axis azimuth of P axis (b), B axis (c), T axis (d)

加 5% 的矛盾比得到的全部解的 P、B、T 轴分布 (图 2b、2c、2d)，可见它们相当集中，表明平均解的质量相当高。

第二类震源机制解的地震的错动性质为正倾滑动类型。其主压应力 P 轴接近直立，方位为 76° ，仰角为 77° 。而主张应力 T 轴为水平 (图 3a)。第三类只有 6 个地震，错动性质为逆倾滑动类型 (图 3b)。主压应力 P 轴接近水平，主张应力 T 轴接近直立，方位为近 321° ，仰角为 68° 。

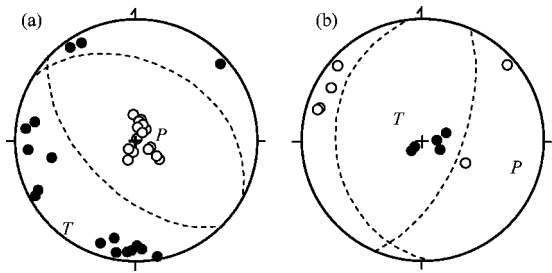


图 3 震源机制倾向滑动类型第二类 (a) 和第三类 (b) 解的上半球投影图
Fig. 3 Projection on upper hemisphere of the second (a) and the 3rd (b) type solution of dip-slip focal mechanism

走滑错动类型地震共有 31 个，约占 57.4%，这显示了序列余震以走滑错动为主的特征。以上分析显示，地震序列中有相当多的震源机制解结果与主震的解一致或相似，构成了主要类型。

我们将全部解求平均值得到：全部解的平均机制解节面 I 走向为 129° ，倾角为 81° ，滑动角为 176° ，具有右旋走向滑动错动性质 (图 4a)。节面 II 走向为 219° ，倾角为 86° ，滑动角为 9° ，具有左旋走向滑动错动性质。主压应力 P 轴方位为 354° ，仰角为 4° ，呈水平状态。主张应力 T 轴方位为 84° ，仰角为 9° ，也呈水平状态。中等应力轴 B 直立。最低矛盾比为 18%，加 5% 的矛盾比得到的全部解的 P、B、T 轴分布 (图 4b、4c、4d)，可见它们相当集中，表明平均解的质量相当高，与图 2 比较，仅有细微差别。

3 震源机制解的空间分布

虽然存在着与主震不一致的正断层和逆断层类型，但是这些类型地震的震源机制解中呈水平的应力主轴和主震的应力轴一致；尽管呈现出调整的性质，结果显示出共同的区域应力场的作用。

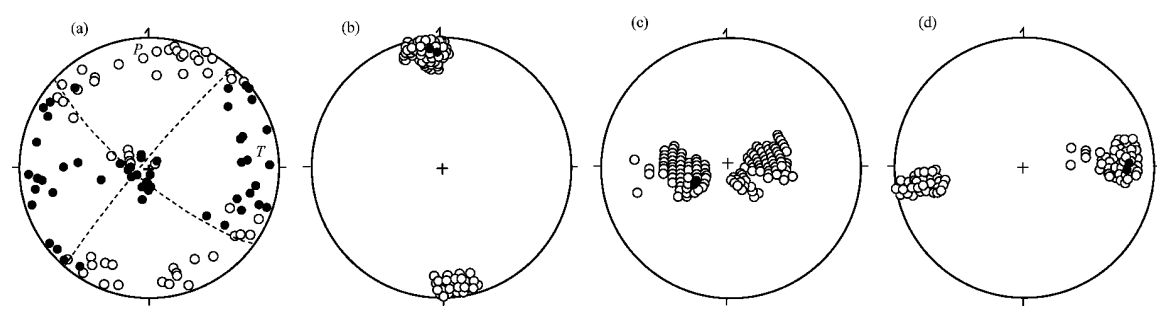


图 4 全部震源机制解的平均解 (a) 和应力轴 P 轴 (b)、B 轴 (c) 和 T 轴 (d) 的角域分布
Fig. 4 Average solution of all the focal mechanism (a) and distribution of stress axis azimuth of P axis (b), B axis (c), T axis (d)

图 5 给出 3 类机制解的空间分布。图中的 3 类解分别以不同符号表示，并且由 2 条直线划分出 4 个象限，标出压应力轴和张应力轴的方位。图 5 显示，倾向滑动类型的地震基本分布在相对的象限，如果 NW 向断层作右旋走向错动，那么滑动断层的前方存在推挤，产生逆冲类型的余震，而其后方出现拉伸，产生正断层类型的地震。在 2 条直线附近存在少量的矛盾，这有可能是震中定位精度不高造成的。

4 与周围地震震源机制的对比

笔者计算得到宁洱地震震区周围 4 次 5 级以上地震的震源机制解（表 2）。把这 4 个解连同宁洱地震的解一并投影在地图上，可见它们基本相同（图 6），这表明震源区应力场和区域应力场完全一致，也说明宁洱地震的孕育和发生受到区域应力场的控制。

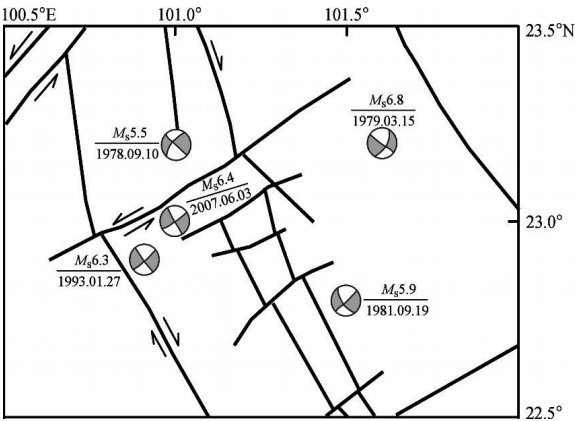
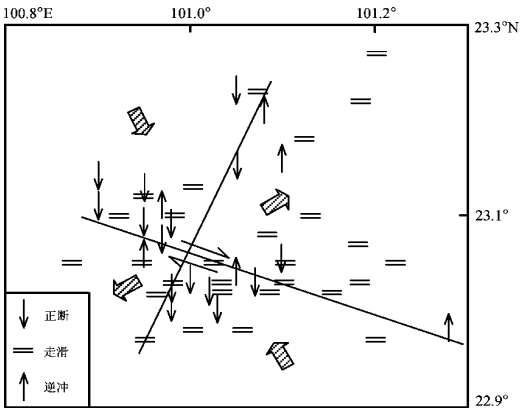


图 5 不同震源机制类型的震中分布
Fig 5 Epicenter distribution of earthquakes with different types of focal mechanism
(↓: normal fault; =: strike slip; ↑: thrust)

图 6 宁洱地震和周围地震的震源机制解投影
Fig 6 Projection of focal mechanism of the ning'er earthquake and the surrounding 4 earthquakes

表 2 宁洱周边地区 5 级地震震源机制解
Tab 2 Focal mechanism of $M \geq 5.0$ earthquakes around the Ning'er area

序号	地震时间			震中位置		震级 M _S	节面Ⅰ			节面Ⅱ			P轴		T轴		N轴	
	年-月-日	时:分:秒		φ _N	λ _E		走向	倾角	倾向	走向	倾角	倾向	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角
				/(°)	/(°)													
1	1979-09-10	07:14:07		23.0	101.1	5.5	223	69	7	131	84	158	179	11	85	20	295	68
2	1979-03-15	20:52:26		23.1	101.2	6.8	33	63	-3	124	87	-152	352	21	255	17	129	62
3	1981-09-19	14:50:55		23.0	101.4	5.9	143	71	-172	50	82	-19	5	19	98	8	209	69
4	1993-01-27	04:32:05		23.0	101.1	6.3	50	82	-5	141	85	-172	6	10	275	2	172	80
5	2007-06-03	05:34:57		23.1	101.0	6.4	58	86	-1	148	89	-176	13	3	283	2	161	86

5 认识与讨论

(1) 宁洱地震序列的发震断裂呈 NW 走向，倾角陡立，在接近水平的 NNE 向压应力作用下，具有以右旋走滑为主的错动性质。主震、最大余震和众多的余震与主震发生在同一发震断裂上，是序列的主体。

(2) 大量的余震震源机制解结果与主震的结

果一致或相似，是序列震源机制解的主要类型，但也存在与主要类型不一致的倾向滑动类型，这可能与余震破裂起始点的微构造控制作用有关。但它们呈水平向的应力轴与主震一致，这是受域应力场共同作用的结果。

(3) 沿序列分布的长轴方向画直线，再过主震画正交的直线，把余震区划分出 4 个象限。可以看出，倾向滑动类型的地震基本分布在相对的象限。NW 向断层作右旋走向错动，滑动断层推挤的

象限内都是逆冲类型的余震, 而拉张的象限都是正断层类型的余震。

无论是节线的走向还是张、压应力主轴的方位都和主震存在约 20° 的差别。这个差别是因为定位精度不够, 还是受预存软弱面的影响形成的, 需要更精细的资料和更进一步的研究。

(4) 与震区周围 4 次 5 级以上地震的震源机制进行比较可以看出, 此次宁洱地震的震源机制与这些地震的震源机制解基本相同, 表明震源区应力场和区域应力场完全一致, 宁洱地震的孕育和发生受区域应力场的控制。

本研究中, 河北省地震局刁桂苓研究员对笔者给予了指导和帮助, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1992. 震源机制解的聚类分析 [J]. 中国地震, 8 (2): 86—92.
- 付虹, 王绍晋, 龙晓帆, 等. 2009. 利用数字化速度波形和仿真位移波形资料求解震源机制解的比较 [J]. 32 (1): 18—24.

- 虢顺民, 汪洋, 计凤桔. 1999. 云南思茅—普洱地区中强震群发生的构造机制 [J]. 地震研究, 22 (2): 105—115.
- 华祥文. 1980. 唐山强震前后北京、天津周围地区应力场的变化过程 [J]. 地震学报, 2 (2): 62—72.
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨 [J]. 地球物理学报, 20 (2): 96—109.
- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 等. 1984. 利用区域地震台网 P-S 振幅比资料测定小震震源参数 [J]. 地球物理学报, 27 (3): 249—257.
- 王绍晋, 阚荣举, 胡克坚, 等. 1989. 云贵地区现代构造应力场空间分布与地震危险区划 [Q] // 云贵地区地震危险性研究文集. 昆明: 云南科技出版社.
- 谢富仁, 苏刚, 崔效锋, 等. 2001. 滇西南地区现代构造应力场分析 [J]. 地震学报, 23 (1): 17—23.
- 许忠淮. 1979. 京津唐张地区地震应力场的方向特征 [J]. 地震学报, 1 (2): 52—58.
- Kisslinger C, Bowman JR, Koch K. 1981. Procedures for computing focal mechanisms from local (SV/P) Z data [J]. BSSA, 71 (6): 1719—1729.
- Snook J A. 1989. Earthquake mechanism [Q] // James D E. Encyclopedia of Geophysics New York: Van Nostrand Reinhold Company, 239—245.

Analysis of Focal Mechanism of the Ning'er Earthquake Sequence

FU Hong WANG Shao-jin LONG Xiao-fan LIU Li-fang WU Cheng-dong
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Using the data recorded by the Yunnan Digital Seismic Network, we calculate the focal mechanisms of the Ning'er $M_s 6.2$ main shock, the $M_s 5.1$ strong aftershock and other 51 aftershocks. The results show that the seismogenic fault was NW-ward and the dip angle was nearly vertical. The fault was right lateral strike-slip, which was effected by the nearly horizontal principal NS-ward compressive stress. The main shock, strong aftershock and some aftershocks occurred on the same seismogenic fault. The focal mechanism of many aftershocks were consistent with the main shock's, which were the main types of the earthquake sequence. The dip-slip aftershocks inconsistent with the main shock showed the adjustment process of the stress field of the focal region, whereas the nearly horizontal press axes were consistent with the main shock. Because of the right lateral strike-slip of the NW-ward fault, the reverse aftershocks occurred in the pressing quadrant while the normal quakes occurred in tensional quadrant. The focal mechanism was consistent with those of other four earthquakes with $M_s \geq 5.0$ around the Ning'er earthquake stricken area, which showed the consistency in the focal region stress field and regional stress field, and the genesis and occurrence of the Ning'er earthquake were controlled by the regional stress field.

Key words: focal mechanism; Ning'er earthquake sequence; stress field