

# 2001 年云南永胜 6.0 级地震余震序列震源机制解与震源区应力场分析<sup>\*</sup>

王曰风<sup>1,2</sup>, 刁桂苓<sup>3</sup>, 张秀萍<sup>2</sup>, 张彦清<sup>2</sup>, 朱振兴<sup>2</sup>, 马利军<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026  
2. 河北省地震局张家口中心台, 河北张家口 075000 3. 河北省地震局, 石家庄 050021)

摘要: 利用垂直向的  $P$  波和  $S$  波的最大振幅比计算方法, 计算了 2001 年云南永胜 6.0 级地震余震序列的震源机制解。通过统计方法和系统聚类分析方法, 结合余震序列的震中分布, 对永胜 6.0 级地震的震源机制解和震源区应力场的特征进行了综合分析。结果表明: (1) 所得发震断层为  $\text{NNW}$  向直立右旋走滑断层, 与美国哈佛大学的主震 CMT 解的节面一致, 也与余震分布一致, 证明结果比较可靠; (2) 震区主压应力场方向为  $\text{NNW}-\text{SSE}$  与其现今区域构造应力场主压应力方向 ( $\text{NNW}$  向) 一致, 表明余震的应力场主要受主震震源应力场的控制。

关键词: 余震序列; 震源机制; 区域构造应力场; 震源区应力场; 云南永胜

中图分类号:  $P315.3^{+1}$  文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)02-0119-05

## 0 引言

求取震源机制解的方法有多种, 比如李钦祖 (1982) 曾提出用 4 个台站记录的初动振幅比求小地震的震源机制解; 梁尚鸿等 (1984) 提出利用  $P$  波  $S$  波最大振幅比资料反演中小地震的震源机制参数。后一种方法进一步发展了震源机制解的求解技术, 使利用  $P$  波、 $SV$  波、 $SH$  波的初动和振幅比联合计算震源机制解的方法在我国得到了初步应用并取得了较好成果。而且, 在至少一个台站  $P$  波初动清楚的情况下, 也可以利用该方法进行计算。因其具有精度高、需用的记录少、使用起来灵活方便等优点, 这一方法受到广泛重视。胡新亮等 (2004) 还经过实例对比分析, 证实了利用区域地震台网  $P$  波  $S$  波振幅比资料测定震源机制解的可靠性。笔者采用梁尚鸿等 (1984) 提出的方法计算了 2001 年 10 月 27 日云南永胜 6.0 级地震余震序列的震源机制, 并且采用统计方法和系统聚类方法对计算得到的多个震源机制解进行了综合分析, 进一步分析了发震断层的几何参数、震源区的应力状态及其与区域应力场的关系。

## 1 方法和资料

本文所用方法要求至少 3 个以上的台站记录良好及至少 1 个台的记录有清楚的  $P$  波初动。通过量取垂直向  $P$  波  $S$  波最大双振幅, 利用振幅比拟合求取震源机制解。速度结构模型采用胡鸿翔等 (1986) 提出的楚雄 (西) 速度结构模型 (表 1)。

表 1 反演计算采用的速度结构模型

$P$ 波波速 / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	地层上界与地面距离 / $\text{km}$
4.30	0.00
5.92	3.23
5.92	18.70
6.54	28.00
7.75	41.90
8.30	50.60

2001 年 10 月 27 日 13 时 35 分, 云南省永胜县发生 6.0 级地震。震中位于永胜县涛源乡和期纳镇交界处, 地理位置  $26.2^{\circ}\text{N}$   $100.6^{\circ}\text{E}$  震源深度 10  $\text{km}$ 。主震发生后云南省地震局立即在地震现场布设了 6 个临时地震台, 组成了数字流动台网 (图 1)。使用仪器为 EDAS3M 型地震数据采集器,

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-05-29.  
基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAC01B02-01-01) 资助。

采样率为 100 Hz 拾震器为 JC-V100-3D型三分向短周期地震计。6个台站的震中距在 1~25 km范围内, 2001年 10月 28日至 11月 28日期间共记录到余震 673次, 最大余震  $M_L 4.1$ , 最小余震  $M_L 0.5$  (王新岭等, 2005) (图 1)。

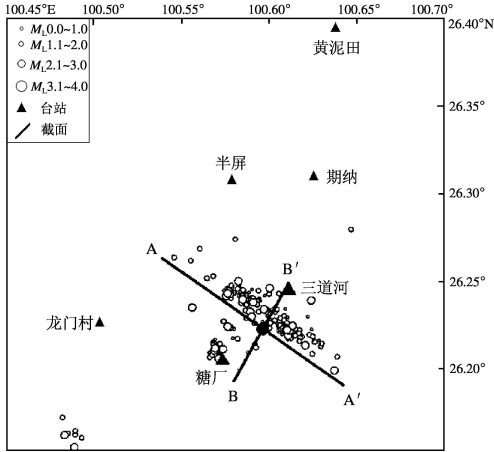


图 1 永胜 6.0级地震余震观测台和震中分布图

2 震源机制参数的统计分析

因为得到的震源机制参数较多, 无法逐一分析比较, 笔者采用统计方法 (刁桂苓等, 1996<sup>a</sup>, 1996<sup>b</sup>) 来寻找它们的共性特征。即将 120个震源机制解的参数放在 360°角域内, 从 0°起, 每 10°间隔划分为一个角域, 进行归一频数划分。下面就划分结果分别进行讨论。

2.1 节面分析

节面走向: 由统计结果可知, 在每个角域都有节面分布, 表明地震破裂面取向较为离散, 但是在 135°~190°、45°~100°之间有 134个节面, 它们所占的比例为 60%, 说明 NNW—SEE向与 NNE—SSW向这两组占优势。

节面倾角: 接近直立 (60°~90°) 的节面有 142个, 占节面总数的 60%以上, 所占比例最大; 倾斜 (30°~60°) 的节面有 58个, 占总数的 24%; 近于水平 (0°~30°) 的节面总数有 42个, 占总数的 17%, 说明节面倾角的优势取向为近于垂直。

节面滑动角: 若取滑动角在 0°~30°、0°~-30°、150°~180°、-150°~-180°角域内的断层为走滑, 滑动角在 60°~120°、-60°~-120°之间的断

层为倾滑, 在上述角域之外的为斜滑, 那么走滑的节面为 104个, 占总数的 43%; 斜滑的节面为 76个, 占总数的 31%; 倾滑的节面为 62个, 占总数的 25%。由分析可知, 走滑占绝对优势。

2.2 P轴空间分布

P轴方位分布: 在 101°~180°角域内有 71个 P轴, 占总数的 60%, 取 140°方向为其角度分布优势方向, 则 P轴方位的优势取向为 NNW—SSE向。

P轴与铅垂线夹角分布: 在接近水平的 0°~30°之间, P轴的分布个数为 56 占总数的 47%; 在 30°~60°之间, P轴的分布个数为 59 占总数的 49%; 在 60°~90°之间, P轴的分布个数为 5 占总数的 4%, 表明接近直立的 P轴很少, 接近水平的居优, 但是分布个数最多的角域是 60°~70°。

2.3 T轴取向分布

T轴方位分布: 在 0°~90°角域内有 77个 T轴, 他们占 T轴总数的 64%, 其余的分布在 90°~180°角域, 所以 T轴的优势取向为 45°附近, 即 T轴优势取向为 NEE—SWW向。对照前文, T轴和 P轴的优势方位互不重叠, 且近于正交。

T轴仰角分布: 在接近水平的 0°~30°之间, P轴的分布个数为 60 占总数的 50%; 在呈倾斜的 30°~60°之间, P轴的分布个数为 57 占总数的 47%; 在近于垂直的 60°~90°之间, P轴的分布个数为 3 占总数的 3%, 表明接近直立的 T轴很少, 接近水平的居优, 但是分布个数最多的角域是 60°~70°。相比之下, T轴比 P轴更接近水平。

2.4 N轴仰角分布

在稍倾斜的 40°~80°角域范围分布最多, 有 87个 N轴, 占 N轴总数的 73%; 而在近于水平的 0°~40°只有 22个 N轴, 占总数的 18%, 证明地震的倾向滑动是客观存在的。

综上所述, 2001年永胜 6.0级地震余震序列震源机制解经统计得到的优势空间分布取向为: 主压应力轴为近水平的 NNW—SSE向, 主张应力轴为近水平的 NEE—SWW向, 中等应力轴近于垂直; 破裂面走向呈多样性, 但节面以高倾角居多, 节面的滑动方式以走滑为主, 斜滑次之, 倾滑最少。

3 系统聚类分析

为了更好地比较各个震源机制解之间的异同，判别它们之间的亲疏程度，我们采用系统聚类分

析方法（刁桂苓，1992）对 120 个震源机制解进行了分析。以最大距离法，取其阈值  $T=100$  将 120 个震源机制解划分为 16 类。表 2 给出了各类平均机制解的空间取向参数，表中的最后一栏为该

表 2 16 类平均解应力轴的参数表

类型	P 轴方位角 /(°)	P 轴与铅垂线夹角 /(°)	T 轴方位角 /(°)	T 轴与铅垂线夹角 /(°)	N 轴方位角 /(°)	N 轴与铅垂线夹角 /(°)	数量 / 个
1	179	81	255	86	11	9	20
2	237	88	144	67	331	23	18
3	22	78	123	79	250	18	17
4	109	77	18	89	285	13	12
5	326	88	227	88	90	3	9
6	239	45	101	53	353	68	8
7	137	54	265	51	22	60	5
8	292	61	151	35	33	72	6
9	52	63	209	28	317	81	6
10	177	89	74	5	267	81	5
11	60	87	118	6	330	85	2
12	102	28	236	68	334	71	5
13	25	15	135	83	227	76	3
14	71	40	274	52	175	79	2
15	102	4	217	89	307	87	2
16	316	32	106	61	204	77	1

图 2 是 16 类震源机制解的 P、T 轴的上半球投影，每类解投影图右上角的数字是类型编号，图中还标出了各类机制解的平均应力轴及由此导出的平均节面，可将其作为该种类型的平均机制

解看待。图 2 表明，1~7 类是走滑，8~11 类是逆冲滑动，12~16 类是正断层滑动。其中，1、2、5 类和主震 CMT 解一致，称为主类；3、4、6、7 类相对于主类偏转或者稍显倾斜，称为偏转类。

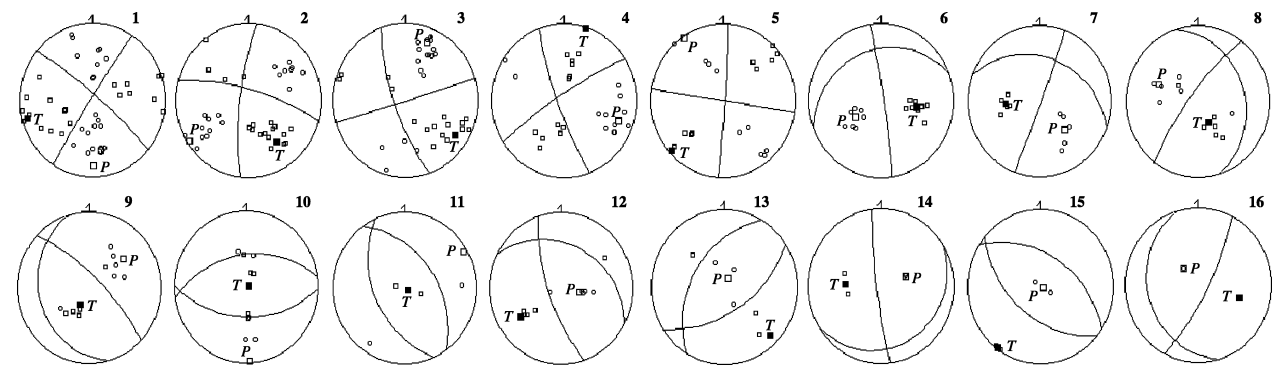


图 2 16 类震源机制解的 P、T 轴及平均解投影

用系统聚类方法把 16 类解再归并为主类、偏转类、逆冲和正断 4 类。图 3 为永胜 6.0 级地震余震序列震源机制断层类型分布图。图中用虚线圈出了震源区， $AA'$  表示断层面， $BB'$  为垂直于  $AA'$  的辅助面，把震源区划分为 4 个象限；空箭头表示区域应力场的作用方式；余震序列按断

层类型投影到震中位置。可以看到，主类离散分布在各个象限；偏转类型发生在断层北盘或者是断层面上；正断层类型集中在南、北两个象限；逆断层类型集中在东、西两个象限。结合余震空间分布，我们推断主震震源机制 NWW 向节面为断层面。

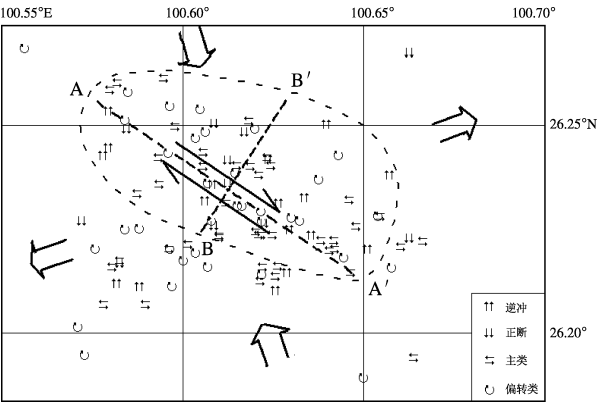


图 3 永胜地震余震序列震源机制断层类型分布图

由图 3 可知, 永胜 6.0 级地震是由于 NNW 向直立断层做右旋走滑运动, 北盘向 SSE 方向运动, 前方受到介质阻挡, 出现逆冲, 相应后端 (NNW 方向) 受到拉张发生正断层错动的结果。南盘和北盘作相对运动, 规律与北盘对应。震源区外发生一些离散余震, 南部正断层余震很少。

主震的震源机制取自美国哈佛大学的 CMT 解, 和当地的构造应力场一致。永胜震区位于滇西北地区, 前人对该区构造应力场进行过深入研究 (吴建平等, 2004; 谢富仁等, 1993), 其主压应

力方向为 NNW (325°~355°)。

4 震区构造应力场特征分析

由上述分析可知, 震区主压应力场方向为 NNW—SSE 向 (320°或 140°), 与周光全等 (2002) 给出的震源区现今构造应力场主压应力方向为 NNW 向 (325°~355°) 一致。

一个大震或强震往往与大范围的构造活动有关, 受控于大范围构造应力场的空间分布状态。小地震则往往要受局部构造应力场影响。在序列发展过程中, 由于主震发生而引起的震源区及其附近局部应力场状态的变化必然会对序列中余震的发生造成重大影响。由前文的震中分布图 (图 1) 可知, 主震发生后的余震分布比较散乱, 从其空间分布看, 有成丛集中的现象, 似有近 NW60° 分布的走向, 余震主要分布在主震的东侧。结合余震深度剖面图 (图 4) 可知, 在截面 AA' 方向 (NNW—SSE 向), 沿 SSE 向, 随着震中距的增加, 震源深度加深, 而 BB' 方向 (NNE—SSW 向) 则无此变化。

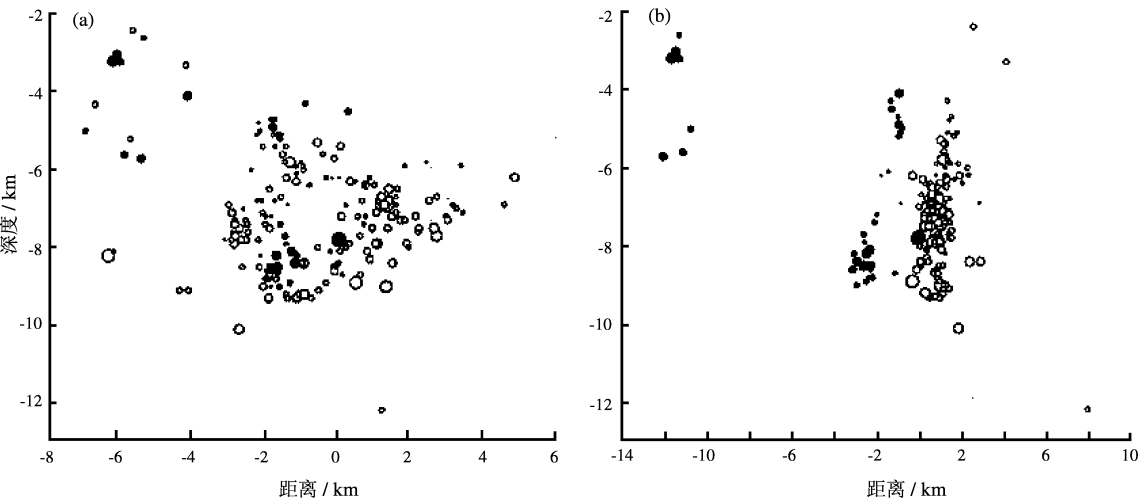


图 4 永胜 6.0 级地震余震序列深度剖面图  
(a) AA' 方向 (NNW—SSE 向); (b) BB' 方向 (NNE—SSW 向)

震区余震震源分布面是一略微倾向 SW、倾角约为 80°~85°、近似于垂直的破裂面, 余震深度范围为 1~13 km, 主要集中在 5~9 km 范围内。永胜地震的主破裂为 NNW 向断层, 余震分布显示断层介于 NNE 向的程海断裂和 NE 向断层之间, 并被其控制。

5 结论

(1) 由余震精定位确定的震源断层与主震 CMT 解的节面一致, 为 NNW 向直立断层右旋走滑, 震中分布也与其一致, 验证了结果的可靠性。

(2) 虽然目前关于强震应力触发问题的讨论甚多, 但是震源区震后存在的应力调整没有得到充分重视, 本研究显示震源区存在清晰的应力调整运动。

(3) 永胜震区区域构造背景复杂, 活动断裂发育, 程海断裂纵贯震区, 永胜 6.0 级地震的发生有其特殊的构造背景。

(4) 永胜 6.0 级地震的主震、余震序列震源机制解一致, 主压应力 ( $P$  轴) 方向为  $140^\circ$ , 即 SSE—NNW 向 ( $140^\circ \sim 320^\circ$ ), 而震区现今区域构造应力场的主压应力方向为 NNW 向 ( $325^\circ \sim 355^\circ$ ), 说明余震的震源机制解绝大多数与主震相近, 表明余震的应力场主要受主震震源应力场的控制, 主震和余震的发震应力场共同构成了震源区的应力场。

(5) 余震虽然震级小、具有随机性, 但对震源区的应力调整反映灵敏, 应当予以重视。永胜 6.0 级地震的余震序列震级普遍偏小 (最大 4.1 级), 表明主震发生使破裂能量释放比较彻底, 余震序列属于低应力调整状态背景下的低能量破裂过程。

## 参考文献:

- 刁桂苓, 程万正, 李桂芳, 等. 1996<sup>a</sup> 1976 年松潘地震序列的小震震源机制 [J]. 地震地磁观测与研究, 17 (5): 34—41.
- 刁桂苓, 王绍晋, 龙晓矾, 等. 1996<sup>b</sup> 1976 年龙陵震群的小震震源机制 [J]. 地震研究, 19 (4): 331—339.
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖, 等. 1992 震源机制解的系统聚类分析——以海城地震序列为例 [J]. 中国地震, 8 (3): 86—92.
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 1986 滇西地区地壳结构的爆破地震研究 [J]. 地球物理学报, 29 (2): 133—144.
- 胡新亮, 刁桂苓, 马瑾, 等. 2004 利用数字地震记录的  $P_g$ — $S_g$  振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析 [J]. 地震地质, 26 (2): 347—354.
- 李钦祖. 1982 华北地区的震源机制与地壳应力场 [J]. 地震学报, 4 (1): 10—15.
- 梁尚鸿, 李幼铭. 1984 利用区域地震台网  $P_g$ — $S_g$  振幅比测定小震震源参数 [J]. 地球物理学报, 27 (2): 15—20.
- 王新岭, 刘杰, 张国民, 等. 2005 姚安地震序列与永胜地震序列的高精度定位 [J]. 中国地震, 21 (3): 386—397.
- 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.
- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等. 1993 中国西南地区现代构造应力场基本特征 [J]. 地震学报, 15 (4): 407—417.
- 周光全, 王晋南, 王绍晋, 等. 2002 永胜 6.0 级地震的地质构造背景及发震构造 [J]. 地震研究, 25 (4): 356—361.

# Focal Mechanism Solution of the 2001 Yongsheng M6.0 Earthquakes Aftershock Sequence and Stress Field in the Source Area

WANG Yue-feng<sup>2</sup>, DIAO Gui-ling<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-ping<sup>1</sup>,  
ZHANG Yan-qing<sup>2</sup>, ZHU Zhen-xing<sup>2</sup>, MA Li-jun<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

(2. Center Station of Zhangjiakou Earthquake Administration of Hebei Province, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

(3. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

## Abstract

We used maximum amplitude ratio of  $P_g$ - and  $S_g$ - wave to calculate the focal mechanism solutions of the 2001 Yongsheng Yunnan M6.0 earthquakes aftershock sequence. Combining with the epicenter distribution of the aftershock sequence, we comprehensively analyzed the solutions and the stress field in the source area by statistical method and systematic clustering procedure. The result shows: (1) The causative fault is NW—direction upright right lateral strike-slip fault, consistent with the plane of CMT solution from Harvard University and with the distribution of the aftershocks, which indicates the credibility of the result. (2) The principal compression stress field is in NNW—SSE, with the same direction as the principal compression stress of present regional tectonic stress field in the source area, which indicates that the stress field of the aftershocks is controlled by the one of the main shock.

Key words: aftershock sequence; focal mechanism; regional structural stress field; stress field in source area; Yongsheng of Yunnan



毛先进 云南省地震局正研级高级工程师。1997年毕业于中南工业大学地质系应用地球物理专业,获博士学位。主要从事工程地球物理勘探及地震电磁学研究。



Kamal AbdelRahman El-Sayed 埃及国家天文和地球物理研究所地震学室副研究员。分别于1999、1994、1990年毕业于 Zagazig 大学,并获工程地震学博士学位、地质学硕士学位和地球物理学学士学位。现主要从事场地效应评估、地震灾害评估和强震动数据的工程应用研究。



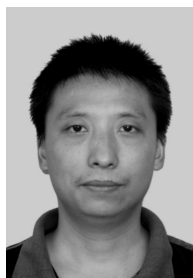
李志祥 云南省地震局地震工程研究院高级工程师。1991年毕业于北京大学地震地质专业。现主要从事建筑工程检测及水库地震监测台网建设工程设计工作,承担“复杂构造区水库地震监测预警研究”运用方面的子课题研究工作。



王 琼 新疆维吾尔自治区地震局副局长研究员。1997年毕业于新疆师范大学地理专业,获学士学位;2000年毕业于中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业,获硕士学位。主要从事地震预报和应力触发等方面的研究。



张卫东 广州航海高等专科学校交通建筑工程系副教授,一级注册结构工程师。2001年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业,获硕士学位。主要从事土-结构相互作用,工程结构抗震、隔震,差异沉降对上部结构的影响及防控等方面的研究及土木工程的教学工作。



皇 民 河南工程学院讲师。1996年毕业于西安矿业学院建筑工程系,获学士学位;现为西南交通大学土木学院博士研究生。研究方向为地下结构动力分析及抗减震研究。



王曰风 河北省地震局张家口中心台工程师。1999年毕业于石家庄经济学院(原河北地质学院)水文地质与工程地质专业,获学士学位;现为中国科学技术大学固体地球物理专业在读硕士研究生。主要从事地震观测与地震分析预报工作。



史 榕 2005年毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院,获硕士学位;现为同济大学海洋与地球科学学院固体地球物理专业在读博士研究生。主要从事 GPS与遥感图像处理方面的工作。