

1995 年云南武定 6.5 级地震 震源断层的三维特征^{*}

刁桂苓¹⁾ 张四昌¹⁾ 王绍晋²⁾
龙晓帆²⁾ 王俊国³⁾

1) 中国石家庄 050021 河北省地震局
2) 中国昆明 650041 云南省地震局
3) 中国天津 300201 天津市地震局

摘要 利用 1995 年武定 6.5 级地震序列中地震的震源分布、震源机制, 从三维空间、时间进程, 研究了武定地震的震源断层的空间取向、活动特征。分析结果表明, 武定地震的震源断层是隐伏在地下的 NWW 走向直立的右旋走滑断层, 与极震区烈度分布一致。虽然有大规模的 NS 向汤朗—易门活动断裂纵贯震区, 武定 6.5 级主震的发生与它无关。鉴于强震和浅表地质活断层之间关系的不确定性, 需要了解地壳的深部构造。本文提出的方法可以识别地壳深部的震源断层。

关键词 武定地震 震源机制 震源断层 深部构造

引言

地震是断层作用失稳的现象, 研究地震时断层的几何形态、运动状况是地震工作的基本任务。由于地震发生在地壳的深部, 自然首先应当分析震源处的断层。近年华北地区地壳深部勘探成果表明, 存在于断陷盆地边缘的浅表地质活断层, 往往与深部发生地震的断层并不连通, 也就是通常所说的深浅构造不一致的问题(张四昌等, 1995), 因此, 不能简单地把发生地震的震源断层与震源上方的浅表构造断层等同起来。1995 年 10 月 24 日 06 时 46 分云南省武定县发生 $M_s 6.5$ 地震, 主震之后发生大量余震。我们利用地震序列的震源分布、震源机制资料, 分析了震源断层的三维特征, 并结合地质构造讨论了有关震源断层和活动构造的问题。

1 震中分布分析

发生强震的震源断层, 不会在主震破裂错动后立即停止活动。在震源断层面及其两侧岩体中, 仍然有剩余能量的释放(或应力场调整)产生余震, 从而构成地震序列。因此, 用

* 地震科学联合基金资助课题。

1998-08-12 收到初稿, 1998-11-06 收到修改稿并决定采用。

序列中地震的震源位置，可以描述震源断层的产状、埋深和规模。尤其是当震源断层没有反映到地表时，震源位置在地表的投影则提供了震源断层空间展布等信息。武定地震伴随大量余震可供分析使用。取昆明遥测地震台网 1995 年 10 月 24 日～1996 年 2 月 1 日期间武定地震序列目录中 $M_L \geq 4$ 的地震，做出震中分布图（图 1）。震中分布大体可以划分成 NWW 向和与其共轭的 NNE 向两个条带。4 级以上地震基本都集中在条带上。NWW 向条带长约 30 km，宽约 9 km，长轴走向 $N65^{\circ}W$ ；NNE 向条带长约 25 km，宽约 7 km，长轴走向 $N10^{\circ}E$ 。前者比后者规模大。

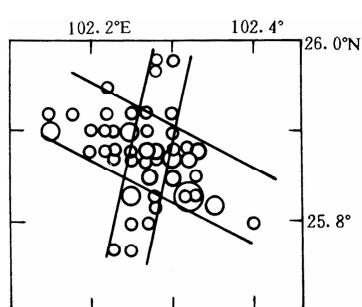


图 1 武定地震序列 $M_L \geq 4$ 震中分布

把地震序列划分成 4 个时段：① 1995 年 10 月 24～30 日；② 1995 年 10 月 31 日～11 月 10 日；③ 1995 年 11 月 11～30 日；④ 1995 年 12 月 1 日～1996 年 2 月 1 日。分别作出震中分布图（图 2a, b, c, d），考察地震序列震中分布图象的发展过程。

图 2a 是前 7 天地震分布，地震集中在 NWW 向的地震条带上，主震的位置偏东。这一阶段的地震强度最高，全序列中 10 次 5 级以上的余震，此时段发生了 8 次。图 2b 则发生了变化，虽然 NWW 向地震条带仍有地震发生，此时段出现了 NNE 向地震条带。这一阶段地震的强度比前一阶段弱，有 2 次 5 级以上地震，时间持续了 11 天。图 2c 又恢复到第 1 阶段的形态，呈 NWW 向条带，几次 4 级以上地震可以连成一条线，而 NNE 向条带消失，这一阶段持续了 20 天。图 2d 又恢复到第 2 阶段的形态，NWW 向地震条带仍有地震发生，此时段再次出现了 NNE 向地震条带，这一阶段持续了 60 余天。4 个阶段的持续时间逐渐增大，强度逐渐减弱，表现出随时间衰减的过程。在形态上，第 1, 3 阶段一致；第 2, 4 阶段一致，随时间交替出现。NWW 向条带活动强度高，以它活动为主时，NNE 向条带没有地震。NNE 向条带活动强度低，以它活动为主时，NWW 向条带的地震仅仅是活动水平减弱而没有平息。从地震活动的强度、规模和持续时间方面看，以 NWW 向条带为主，NNE 向条带为辅。主震的震中位置位于 NWW 向条带上，主震后 7 天之内的余震也都位于 NWW 向条带上，因此认为，主震和 NWW 向条带的关系更为密切。

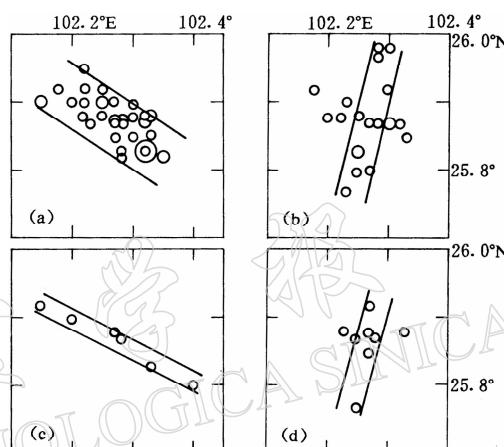


图 2 武定地震序列 4 个时段震中分布

2 震源剖面分析

在选取所分析的地震时，如把地震目录的震级下限降到 $M_L 3.0$ ，可使地震的数目更多

一些便于分析。考虑到 NWW 向地震条带存在于整个序列，取出图 1 中 NWW 向条带范围内的地震。由于地震目录中的深度数值是以 5 km 为一档，为了分析方便，采用乘以随机系数的方法，把深度在 5 km 的层位内展开。分别作出沿 NWW 向条带短轴、长轴的震源深度剖面，如图 3a, b 所示。图 3a 中左为 SW，右为 NE；图 3b 中左为 NW，右为 SE。在短轴方向，地震大部分集中于 5~15 km；然而 SW 一侧，在 0~5 km、15~25 km 也有一些地震发生。在长轴方向，地震密集成团，深度范围在 5~15 km，由主震向 NWW 自深而浅。主震的 SEE 方向地震离散分布。0~5 km 地震较少。

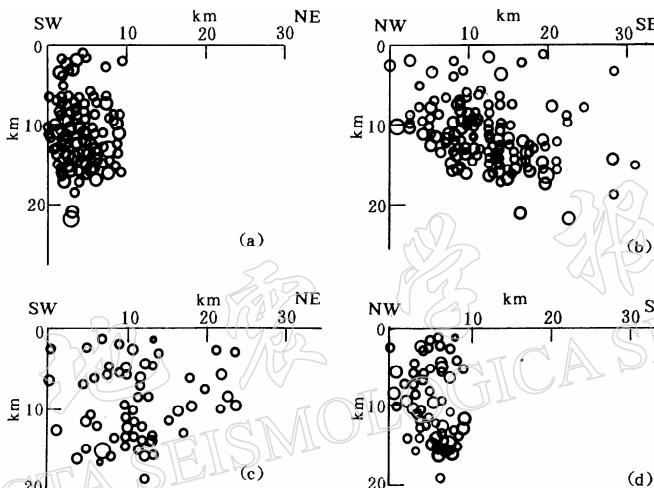


图 3 武定地震序列 NWW(a, b) 和 NNE(c, d) 条带震源剖面

因为 NNE 向条带仅在第 2、第 4 阶段出现，该条带上的地震就从图 2b, d 的范围中选出。采用同样的方法，分别作出沿条带长轴、短轴的震源深度剖面如图 3c, d 所示。图 3c 中左为 SW，右为 NE。图 3d 中左为 NW，右为 SE。在短轴方向，地震分布在 0~20 km；在长轴方向，地震的分布可以划分为南北两段。北段的地震少仅仅 14 次，深度范围在 0~10 km；南段的地震多达 52 次，深度范围在 0~20 km。南北两段差异明显。

3 震源机制分析

马淑田, 赵薇(1997)采用矩张量反演方法给出了武定地震主震的最佳双力偶解。参数如下：

节面	走向	倾角	滑动角	应力轴	方位	仰角
I	106°	90°	180°	P	331°	0°
II	196°	90°	0°	T	61°	0°
				N	220 °	90°

我们收集了武定周围 10 个地震台的地震波资料，采用理论地震图拟合直达 P 波、S 波最大振幅比的方法(梁尚鸿等, 1984)，反演中小地震震源机制。最后得到 156 次 M_{L} 3.0 以上余震的震源机制。这些地震的震中分布如图 4 所示，时间分布在 1995 年 10 月 24 日~11

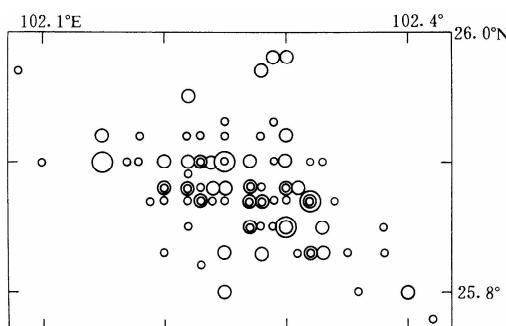


图4 已得到震源机制解地震的震中分布

月30日。从时空分布来看，这156次地震基本能够代表武定地震序列。由于余震的数目比较多，难以一一比较。因此采用震源机制解的系统聚类分析方法（刁桂苓等，1992），以最大距离法，距离上限取120 km，把156个余震震源机制划分成7种类型。7类解的P, T轴及其导出的平均解上半球投影，一并示于图5，相应参数列于表1。第1, 3两类差别不大，仅在 NWW向高倾角的节面倾向不同。第2类相对1, 3类稍有偏转，差别也

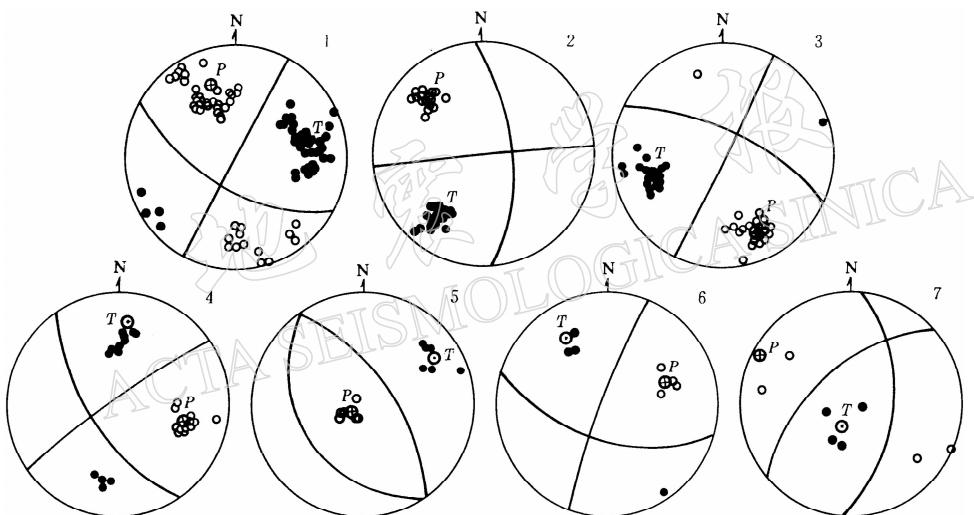


图5 7种类型震源机制解P, T轴及其平均解上半球投影

不大。前3类机制解与主震机制解接近，故把它们作为地震序列震源机制的主要类型。3种类型机制解的数目占全部解的5/6。第4, 6两类属于相对主要类型的反向错动。第5, 7两类属于倾向滑动，前者是正断层，后者是逆断层，属于震源区内的调整活动。后4类机制解的数目较少，仅占1/6。把主要类型机制解求出平均解，与主震的机制解一起绘于图6。两相对比，仅存在极其细微的差异。两个节面都是陡立状，走向分别是NWW和NNE向。压应力主轴呈水平方位NNW，张应力主轴呈水平方位NEE。

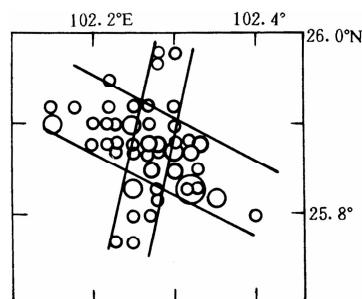


图6 主震的机制解和余震主要类型的震源机制解平均解的上半球投影

表 1 7 种类型震源机制解平均解的应力轴和节面取向

类型	P 轴		T 轴		N 轴		节面 I		节面 II		机制解数目
	方位 /(°)	仰角 /(°)	方位 /(°)	仰角 /(°)	方位 /(°)	仰角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	
1	339	22	79	25	212	56	300	56	28	2	67
2	315	19	216	23	81	59	85	88	176	60	32
3	158	16	254	20	32	64	207	87	116	64	26
4	104	25	6	17	245	59	55	84	326	60	15
5	233	75	55	16	325	0	145	60	326	29	8
6	70	31	328	19	211	52	286	53	21	82	4
7	297	4	205	65	29	25	49	53	185	48	4

4 结论和讨论

大多数余震的震源机制与主震的机制解相近或相同, 表明它们是在受到相同的构造应力场的作用下发生的。由此推知, 武定地震周围的构造应力场的方向是: 最大压应力主轴呈水平方位 NNW, 最小应力主轴呈水平方位 NEE, 中等压应力主轴直立; 并且构造应力场的应力方向是稳定的, 没有因为发生了武定地震主震而发生改变。

地震序列的条带分布恰好与主震、大多数余震的机制解的节面一致, 即走向 NWW 和 NNE。剖面显示地震带是陡立状, 也与节面的直立性质相同。因此, 在当地构造应力场的作用下, 发生在 NWW 向条带上的地震, 应当属于右旋走向滑动; 而发生在 NNE 向条带上的地震, 应当属于左旋走向滑动。武定地震的震源断层是近于直立的 NWW 和 NNE 向共轭断层组合。由前面震源分布分析可知, NWW 向地震条带起着主导作用, 并且主震之后的第 1 阶段仅有它在活动, 因此判定武定 6.5 级地震的震源断层是 NWW 向的直立断层, 错动性质为右旋走向滑动; 而 NNE 向的直立断层, 是地震序列过程中受牵动产生的活动。

由图 3b 的地震密集区分析, 主震呈 NWW 向的单侧破裂。因为主震震源的 SEE 方向, 余震分布离散, 没有连成一体。主震震源向 NWW 方向, 具有共同错动性质的大大小小的余震破裂面相互沟通, 以及主震破裂面的延展, 而构成一个破裂带。图 3a 显示沿 NWW 条带中心线两侧也有差异, 似乎表明破裂带中间存在一个主破裂面, 也就是主震震源断层面。至于图 3a 显示的 NNE 条带南北两段余震活动的强弱、埋深之间的差异, 表明被在它之前破裂的 NWW 向条带切割成两段。NWW 条带的右旋滑动, 使 NNE 向条带的北段挤压、南段拉张弱化, 因此南段更易于活动。

据云南省地震局的地震现场考察、研究^①, 武定震区位于川滇南北向构造的南段, 滇中断隆的中部。滇中断隆由东到西分布有小江断裂、普渡河断裂、汤朗—易门断裂、元谋—绿汁江断裂。它们呈南北向近等间距展布。汤朗—易门断裂的北段发窝—插甸断裂纵贯震区, 第四纪晚更新世以来的活动性表现较为强烈。其活动方式是在垂直差异升降运动的同时, 兼有较强烈的左旋水平滑动。晚更新世以来的水平滑动量约为 500~1 000 m。NW 向断裂规模较小, 延伸不长, 仅仅 5~10 km。看来没有与本文分析所得到的 NWW 向震源断层相应的地表断裂。

^① 云南省地震局武定地震现场指挥部, 1997. 1995 年武定 6.5 级地震现场考察、研究。

极震区产生的地震地表形变带规模较小，展布规律性差，受重力因素影响大。武定地震极震区烈度达 IX 度，长轴方向约 285° ，长约 28 km；短轴长 $10\sim20$ km，呈不规则的梨形。极震区长轴的走向、规模与本文给出的 NWW 向震源断层吻合。事实表明，武定地震没有发生在地表出露南北向的大型活动断层上，而是发生在地壳深部的 NWW 向断裂中。武定地震破裂也没有延伸到地表。因此看来，华北地区存在的深浅构造不一致问题，西南地区也需要研究。

地壳深部细结构探测由于技术难度大、费用高，不可能全面展开。本研究采用的方法比较简单，既使用主震的资料，更考虑了大量余震的群体贡献。当大量地震的震源空间分布、震源机制与地震的地表现象相互吻合时，可以认为分析结果是可靠的。并且这个地震学与地震地质学相结合研究震源断层的方法，适宜于当前的工作状况。我国已经布设了大量的地震台网，对于强震序列大都能取得较好的地震记录。充分利用这些宝贵的资料，提高对地震序列震源定位的精度，补充测定大量余震的震源机制，能够对震源断层有更确切的认识。对深入了解强震震源断层和已知地质构造之间的关系具有重要的意义。

参 考 文 献

- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1992. 震源机制解的系统聚类分析. 中国地震, 8(3): 86~91
梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 等. 1984. 利用区域地震台网 P、S 振幅比资料测定小地震震源参数. 地球物理学报, 27(3): 249~257
马淑田, 赵薇. 1997. 1995 年 10 月 24 日云南武定 $M_S=6.5$ 地震的震源机制解. 地震学报, 19(3): 241~245
张四昌, 赵军, 刁桂苓. 1995. 华北地区震源断层与深浅构造关系的初步研究. 13(2): 1~10