

杨雅琼, 冯向东, 刁桂苓, 等. 震源断层方法在活断层探测中的应用[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 70–75. [YANG Yaqiong, FENG Xiangdong, DIAO Guiling, et al. The application of seismogenic fault method in active fault detection [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 70–75. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.02.014.]

## 震源断层方法在活断层探测中的应用<sup>\*</sup>

杨雅琼<sup>1</sup>, 冯向东<sup>1</sup>, 刁桂苓<sup>1</sup>, 徐锡伟<sup>2</sup>

(1. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 2. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

**摘要:** 通过精确修订震源位置后, 小震呈现线性或带状分布规律, 使用数学方法对线性或带状分布的中小地震拟合一个空间的平面作为震源断层, 来揭示地震空间分布与活动构造的关系。以 1976 年唐山 7.8 级地震、1668 年郾城 8  $\frac{1}{2}$  级地震和 2013 年芦山 7.0 级盲断裂地震为例, 对大震区余震的震源断层进行拟合, 获得了 3 次地震发震断层在震源深度上的几何结构和运动方式, 且拟合结果与深部构造探测比较吻合, 表明震源断层方法对于活断层探测有重要的补充意义。

**关键词:** 活断层; 震源断层拟合; 唐山 8.0 级地震; 郾城 8  $\frac{1}{2}$  级地震; 芦山 7.0 级地震

**中图分类号:** P315; X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000–811X(2018)02–0070–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.02.014

傅承义先生<sup>[1]</sup>指出地震成因性的构造活动常起源于地壳深处, 要阐明孕震过程, 不能仅靠地质观测, 还需要地震学的方法来研究深部构造运动。用深地震测深和地震波的方法可以探明地壳深部的构造和介质环境, 分析地震图的初动方向和其他震相的振幅可以推算地震断裂的运动方向, 而现今的数字地震仪可以划出地下微弱震动的震中汇集带——这可能就是地壳深部地震成因断裂在地面上的痕迹。地震学方法可以弥补地质方法之不足, 对了解地震的构造环境大有帮助。

地震的震源错动或破裂与活动断裂作用是有区别的, 但许多地震沿地表可见活动断层产生一定类型的地表破裂带, 表明深浅构造之间确实存在着某种内在的力学联系或地壳介质变形的深浅转换<sup>[2–4]</sup>。震源断层、构造断层、地震断层是既互相联系又有一定区别的概念<sup>[5]</sup>。确定震源断层的几何学、运动学和动力学特征, 分析震源断层与构造断层、地震断层之间的关系, 是地震研究的一个重要领域, 还有很多未解决的问题。地震活动与地质构造的关系是地震地质学研究的基本内容, 也是本学科应用于地震预测的主要依据。地震与地质构造之间的主要矛盾之一是两者在空间上的差异, 即地壳深部的震源构造与浅层地质构造的差异<sup>[6–10]</sup>。地震定位确定的震源位置是地震初始破裂点, 震级低则震源体积也小, 作为一级近似, 可用初始破裂点表示中小地震的震源体。

当震源位置在地表的投影——震中分布密集成带时, 表明这些破裂点相当集中。虽然大量小震震源体未必相互衔接, 但是它们共存于一个条带上, 应当具有成因上的联系。强震发生时, 震源错动必然使断层面及其两侧岩体处的介质相对破碎, 在构造应力场的作用下震源区易于发生小震, 我们可以将其作为研究对象, 寻找深部断层活动的证据<sup>[11–14]</sup>。

活断层探测项目属于科学工程, 具有一定的探索性。严格说来现在的地震活动断层的定义比较适合于我国西部<sup>[15]</sup>, 东部的情况比较复杂, 存在深浅构造不一致的问题, 而地震往往和深部构造活动有关。因此在《中国地震活动断层探测技术系统技术规程》<sup>[16]</sup>的总则中明确指出: 应依据本技术规范的要求, 结合本地区的实际情况, 确定具体的目标与技术途径。鼓励开拓和引进先进有效的新技术、新方法。邓起东<sup>[17–18]</sup>在讨论“城市活动断裂探测和地震危险性评价问题”时用“有没有、活不活、深不深, 震不震, 错不错, 好对策”这 6 句话来涵盖其核心内容, 这 6 个方面相辅相成、缺一不可。由于活动断层探测的目标区一般位于盆地或平原区, 被不同厚度的第四纪松散沉积物所覆盖, 探测的目标断层绝大多数为隐伏断层, 仅仅依靠地表地质地貌工作已不可能对断层定位和活动性进行全面研究。因此, 地球物理、地球化学等方面的探测就成为城市活动断层探测中必不

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017–08–27      修回日期: 2017–11–06

基金项目: 河北省地震局地震科技星火计划重点项目“晋冀蒙交界地区典型盆地孕震动力学模型构建”(DZ20160621076)

第一作者简介: 杨雅琼(1982–), 女, 河北张家口人, 副编审, 主要从事地震科学研究及期刊编辑管理工作。

E-mail: praguegirl@163.com

可少的重要手段。已有的工作实践证明,在城市活动断层探测和断层活动性评价中,地质地貌、地球物理、地球化学和钻探工程等有机结合起来是正确解决断层定位和活动性的根本保证<sup>[19-24]</sup>。

## 1 方法

近年来随着数字地震观测技术的提高和数字地震台的广泛布设,使得震相拾取越来越精确,地震定位精度大幅提高<sup>[25-29]</sup>。基于小震空间分布对地质构造及地球物理相关问题的研究引起地球科学家的关注,特别是近年来中国地震局广泛开展的城市活断层探测项目,除了用地震测深方法得出地下结构的信息外,还可以利用大量小震位置独立地给出活断层的几何形态,并采用局部应力场参数得到断层的滑动性质,提供另外一种约束。前人研究采用小震精确定位的丛集性描述断层几何形态大多数为定性描述,迫切需要一种方法来对深部断层的几何结构进行更为精确的量化描述。根据成丛小震发生在大震断层面及其附近的原则,万永革等<sup>[30]</sup>将模拟退火算法和高斯—牛顿算法结合,提出利用小震密集程度求解主震断层面走向、倾角、位置及其误差的稳健估计方法,并在考虑区域构造应力参数的基础上,给出了估计已求得的断层面的滑动角的方法。该方法不仅能在全局搜索最优解,而且可以估计参数的误差,并且在求得大震断层面后还可以根据区域构造应力场参数得到断层面上滑动角的估计。如果在地震之后快速确定小震的震源位置,则可以独立于体波、面波和大地测量数据之外给出地震断层面参数的另外一种约束。近年来随着相对定位方法和波形互相关技术的应用,小震定位精度越来越高,使得采用小震的丛集性确定深部活断层几何形态成为可能。通过地质方法仅能观测活断层的地表破裂形迹,深部断层与浅部破裂构造形态可能存在较大差异,该方法在确定地质活断层震源深度的几何形态具有重要意义。此外,本方法还可用于小震活跃地区活断层走向、倾角和滑动角的确定。

万永革等<sup>[30]</sup>的方法通过小震密集程度求解发震断层参数的数学模型,即寻求一个平面,使所有小震震源位置到这个平面距离的平方和最小。由于确定断层参数的小震已分别确定,采用90%的小震所在区域为断层面的位置似乎是合理的,这样只有10%的小震落在断层面外的区域。因此,将最上面的2.5%小震的底边界作为该断层面的上边界,将最深部发生的2.5%的小震的上边界作为该大震断层面的下边界,将地震丛集最左端的2.5%小震的右边界作为大震断层面的左边界,将

地震丛集右端的2.5%小震的左边界作为大震断层面的右边界,由此可以确定大震断层面的4个顶点位置。基于合理假定—地震断层错动方向与局部应力场在该断层面上作用的剪切应力方向一致,计算得到滑动角,滑动角对于讨论地震断层相互作用是至关重要的。

## 2 震源断层的实例

### 2.1 1976年唐山7.8级地震

通常我们讨论一条断裂的活动性,最直接的证据就是依据该断裂所切割的最新地层或地貌面,而断裂上断点(断裂所断错的最高层位)的年龄代表了断裂的最新活动时代。因此,断裂的上断点对于判定断裂活动性是至关重要的。以往凡是涉及到断裂活动性的研究,其主要地质证据无一例外地都是一条断裂被某套地层所覆盖,表明该断裂活动在此地层堆积之前。但是,由于第四系松散堆积对断裂活动可能具有吸收和隐藏作用,使得许多研究者注意到这样一个问题,发育在第四系较厚覆盖区的隐伏断裂的上断点不一定就代表了断裂的最新活动时代<sup>[31]</sup>。有些断裂虽未破裂到地表(全新统覆盖),但有可能是全新世活动断裂。对于这些断裂如何确定其活动时代?埋在地表以下较深部位的断裂能否发生较大地震?1976年的唐山7.8级地震的地表破裂带长仅约8~10 km。震区第四系覆盖层厚度有几百米,可能存在未破裂到地表的隐伏活动断裂。对于该地区的断裂活动性如何评价,是一个亟待解决的问题<sup>[32-33]</sup>。

1976年7月28日发生的唐山7.8级地震,产生的地表破裂带最大右旋位错1.53 m,垂直位错0.70 m。唐山地震区位于4条具有一定规模的第四纪活动断裂所围限的构造复杂的菱形块体内,虽然一直以来人们对于该地震的发震构造条件存在较大分歧,但根据地震地表破裂带的空间分布、几何结构和运动学性质以及地球物理探测结果等显示,唐山断裂带作为该次地震的主要发震断裂已被大多数研究者所接受。特别是近期的浅层人工地震探测结果<sup>[34]</sup>,进一步证明了该断裂与1976年唐山地震的密切关系。唐山断裂带位于菱形块体钝角对角线中央部位,是一条与褶皱相伴生的复杂断裂构造带。唐山地震以前,在唐山地震极震区附近并未发现大的活动断裂。即使发生地震以后,地表破裂带长也不过10 km,而且仅出露于极震区。虽然浅层人工地震探测显示唐山断裂断错第四系全新统一下更新统4个界面,甚至断到地表,但这些探测剖面也主要集中于唐山地震约10 km的地表破裂带范围附近。在该地表破裂带以外,

表1 唐山地震主震震源断层参数

震源断层	小震个数	走向		倾角		滑动角		深度/km	长度/km
		值/(°)	标准差/(°)	值/(°)	标准差/(°)	值/(°)	标准差/(°)		
北段	665	233.1	0.5	89.1	1.3	176.1	8.5	7.7~21.8	32
南段	93	210.1	1.2	73.7	2.8	165.6	12.5	6.4~22.9	34

唐山断裂在第四系中的位错并不明显。因此,依据浅层人工地震探测得到的唐山断裂上断点,只能推断极震区存在一条长约 10 km 的活动断裂,这与作为 7.8 级这样大震的一条发震断裂是不相符的。于是,有人发出这样的疑问,何以在唐山断裂如此小的构造上酝酿成大震。由于没有确凿的地质证据,研究者们关于唐山断裂的活动性一直以来含糊其辞。那么,唐山断裂是如其上断点所反映的仅仅为一条长约 10 km 的活动断裂呢,还是一条区域的大型活动断裂?

将震源断层拟合方法用于唐山地震序列<sup>[30]</sup>,采用 2002 年 4 月 1 日至 2006 年 5 月 31 日发生在地震破裂区的双差精定位地震目录,求得了唐山地震的断层面走向、倾角、位置及滑动角参数如表 1、图 1 所示。

由于小地震分布存在不同方向而且相互衔接的 2 个条带,表明唐山地震至少由 2 个子事件组成。我们分别拟合了两个子事件的震源断层,累积长度达到 66 km,与唐山大地震破裂尺度匹配。唐山地震的震源断层在脆性层的深度(6.4 ~ 22.9 km)产生破裂。二条震源断层的倾角较高,作右旋走向滑动,与唐山断裂的实际活动一致。图 1 中红色线段为唐山断裂带,黄色虚线为震源断层在地表的投影。虽然并不完全重合,但是相当接近。

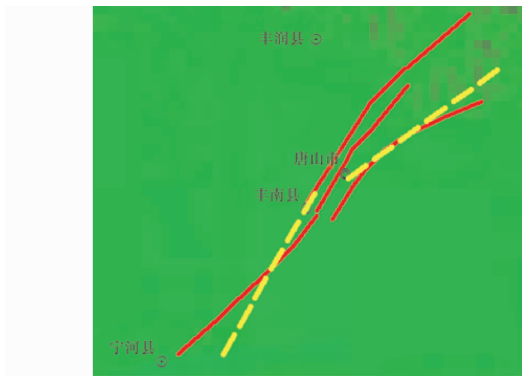


图 1 唐山断裂和震源断层投影

唐山城市活动断层探测布设了跨唐山断裂带的地震深反射剖面,结果如图 2 所示。反射剖面揭示了唐山断裂带在浅部为典型的花状构造,在深部的上下地壳分界面和壳幔过渡带都显示明显的横向间断和反射波能量的变化,表明唐山断裂带下方存在深断裂切割和扰动了下地壳物质和壳幔过渡带<sup>[34]</sup>,可以推断唐山大地震是发生在地壳深断裂之上。

## 2.2 1668 年郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震

1668 年在郯庐断裂带中段—山东境内的沂沭断裂带上郯城附近发生了 8  $\frac{1}{2}$  级巨大地震,这是有史记载以来发生在中国东部的最大地震,也是致灾最严重的地震。对这次地震以往有过不少研究,但主要限于历史文献的考证和地表的地质考察结果,对于地震深部震源断层的产状、与地表活动断裂的连通情况,亦即上下断层的关系,则缺乏清晰的证据和分析。

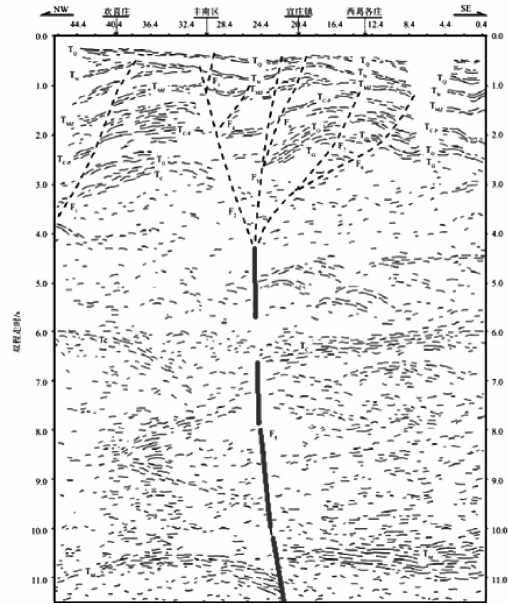


图 2 唐山深地震反射剖面解释图(据参考文献<sup>[34]</sup>修改)

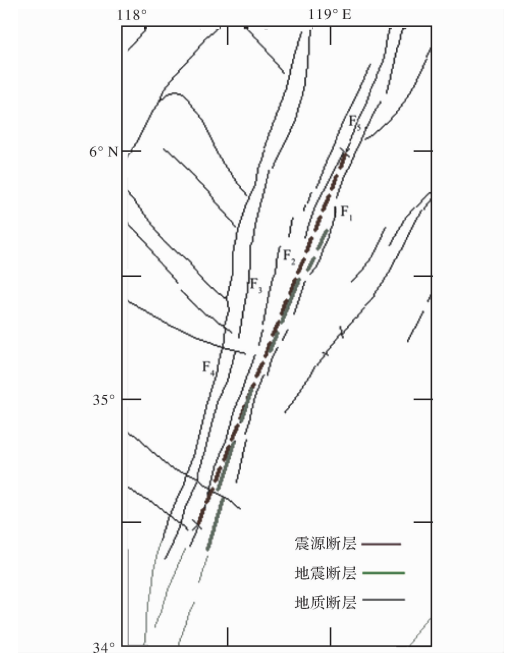


图 3 反演后的 1668 年 8  $\frac{1}{2}$  级地震震源断层在地表投影

F<sub>1</sub> 昌邑—大店断裂, F<sub>2</sub> 白芬子—浮来山断裂,  
F<sub>3</sub> 沂水—汤头断裂, F<sub>4</sub> 郯部—葛沟断裂

周翠英等<sup>[35]</sup>使用震源区的双差精定位目录采用震源断层拟合方法对郯城地震的震源断层进行了研究,反演结果的主要参数由表 2 给出,拟合精度较高、误差小。走向 NNE, 近于直立, 错动性质为右旋走滑, 兼有少量逆冲。破裂深度从 4 km 到 32 km。

郯庐断裂是中国东部最大的一条北北东向断裂带,其中段沂沭断裂带属“两堑夹一垒”结构,中生代以来经历了巨大的左行平移裂谷作用和横向挤压多期构造运动过程。新生代以来裂谷构造遭受挤压逐渐消亡,裂谷中的中生代地层强烈褶皱隆起,从而转化为一条挤压性质的右旋走滑构造带<sup>[36-37]</sup>。在这一过程中,于东地堑断裂 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 之间产生了一条

表 2 郾城地震震源断层参数

小震个数	走向		倾角		滑动角		深度/km	长度/km
	值/(°)	标准差/(°)	值/(°)	标准差/(°)	值/(°)	标准差/(°)		
129	21.57	0.58	89.51	3.72	148.90	9.30	4.2~31.8	180

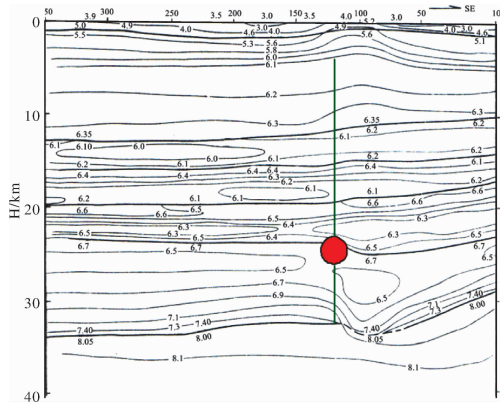


图 4 泗水到连云港地壳速度剖面图

注: 实心圈为本文给出的 8  $\frac{1}{2}$  级震源、绿色线为拟合的震源断层位置示意

新地表破裂, 将其命名为安丘—莒县断裂, 该断裂是一条强震的发震构造。所拟合的 8  $\frac{1}{2}$  级地震震源断层在地表的投影与该断层基本重合(图 3)。

图 4 给出了张碧秀等的速度剖面<sup>[38]</sup> 及大震震源和震源断层的投影, 在速度较高的中下地壳震源断层两侧存在显著的差异, 并且存在断层西部速度普遍低于东部的情况, 这种速度差异处易于积累和释放能量, 属于容易发生大震的部位。

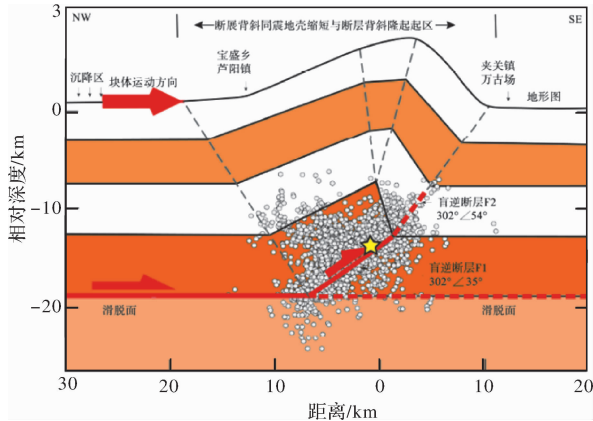


图 5 芦山地震发震构造模型平衡剖面图

### 2.3 2013 年芦山 7.0 级地震

芦山地震区发育着龙门山推覆构造带南段大邑隐伏断裂、双石—大川断裂、盐井—五龙断裂、耿达—一陇东断裂等活动断层。芦山地震没有形成明显的地震地表破裂带, 仅在陡峻地形边坡附近发育大量张性地裂缝和滑坡体<sup>[39]</sup>。分析芦山地震及其余震的分布特征发现, 平面分布显示余震呈 N32°E 密集条带状分布, 长约 45 km, NW 向宽约 27 km, 明显斜切双石—大川断裂(图 5), 说明芦山地震与地表出露的双石—大川断裂关系不大。在横切芦山地震

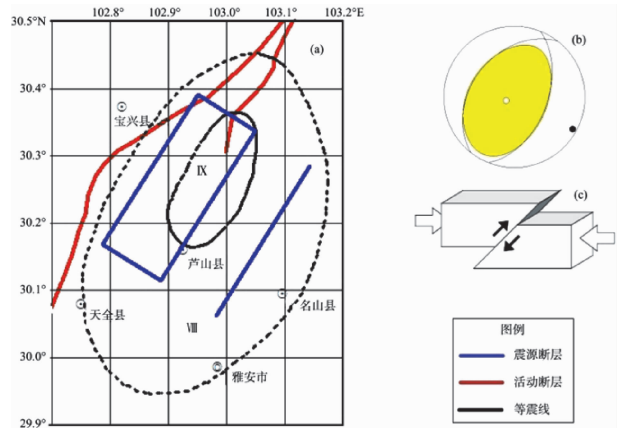


图 6 芦山地震震源断层分析图

注: 图 6a 中黑色封闭线是 X 度和 IX 度等震线, 蓝色框上震源断层在地表的投影, 蓝色线为震源断层延伸到地表的位置, 可见它们共同控制了极震区的分布; 红色线上浅表断层, 震源断层与其无关。图 6b 是芦山地震的矩张量解, 显示逆冲性质, 图 6c 为地震模型。

NE 向余震密集带的深度剖面上, 余震有面状分布特征, 说明芦山地震的发震断层为尚未出露地表的盲逆断层。7 km 以上基本上没有余震分布, 在构造上对应于盲逆断层上断点以上的断层扩展背斜部位(图 5), 对应于芦山县城与雅安城区一带的背斜山地。因此, 深度在 7~9 km 的余震陡倾角条带(F<sub>2</sub>)也有可能为断层扩展背斜陡倾翼变形较大的膝折带, 推测芦山地震属典型的盲逆断层型地震。

根据芦山地震序列的震源位置, 拟合出一个平面, 可以近似得到芦山地震的震源断层。我们直接使用四川省地震局根据四川省数字地震台网波形记录编制的地震目录。前 10 d 的地震目录最早 30 min 能够记录到 3.2 级, 以此作为震级下限。删除外围(也考虑上盘)的离散地震。拟合得到的震源断层的走向 212.2°(标准差 2.0°)、倾向 292.2°、倾角 49.1°(标准差 2.8°)。震源断层长 29.4 km、宽 17.8 km。埋深在 12.4~25.4 km 之间, 没有向浅表延伸。震源断层与龙门山构造带的逆冲性质吻合, 和矩张量解一致, 震源断层的走向与极震区长轴相同。虽然震源断层的顶端中止在极震区的中轴线附近, 但是上盘上冲至顶部, 对于延伸方向的浅部仍然造成严重破坏。有理由认为, 震源断层控制了极震区。

为了适应震后应急救援的需求, 仍然利用四川省地震局编制的目录, 分别取主震后 1 h、2 h 和 16 h 的序列震源位置, 做震源断层拟合, 拟合结果精度很高, 标准差为 1°~8°, 时间越长, 资料越丰富, 误差越小。走向在 207°~216°之间, 倾角在 44°~61°之间, 差别较小, 且和矩张量解非常接近。可见, 震源断层的空间取向比较稳定, 序列早期的结果也可以限定极震区的范围。



### 3 讨论和结论

由于许多城市依水而居,坐落在平原或者盆地,地表多被较厚的土层覆盖,断层全部隐伏于其下。城市活断层探测面对的基本上都是隐伏断层。

邢台地震和唐山地震发震断裂的探测显示,新河断裂和唐山断裂带上断点都未很好地发育在体现断裂新活动性的上更新统一全新统等最新地层里<sup>[40]</sup>。事实说明,中国东部城市较厚第四纪松散物覆盖区隐伏断裂的上断点的年龄与断裂的最新活动时代并不是完全等同的,这与断裂发育地区新生代沉积特别是第四系的厚度有关。除此之外中国东部地区如 1830 年磁县 7  $\frac{1}{2}$  级和 1937 年菏泽 7 级地震,

也均未发现明显的地震地表破裂。而在中国西部地区,如果松散沉积层达到一定厚度,也会出现类似情形。如 1970 年通海 7.7 级地震沿曲江断裂的断错主要出现于基岩出露和覆盖层很薄的地段,当覆盖层超过 30 m 时,基本上未出现地表断错<sup>[32]</sup>。代树红等<sup>[41]</sup>通过模拟实验研究了基岩中走滑断层在上覆沉积层中的破裂扩展特征,利用白光数字散斑相关方法分析了沉积层表面变形场的演化过程,重点研究了基岩断层位移和沉积层厚度的影响。对于同样的基岩断层位移,沉积层厚度越大,受基岩断层控制的变形破裂带越宽,即基岩断层的影响范围越大;但当沉积层厚度超过某一临界值时,沉积层的变形发生了变化,沉积层表面并不存在与基岩断层走向一致的变形带,而是发育了较大尺度、与基岩断层走向斜交的张剪性破裂带。实验结果意味着,临界断层位移和临界沉积层厚度对于确定隐伏断层发震产生的地表变形和破坏并不是简单的对应关系。

通常认为大地震常沿地表活动断裂发生,并往往形成长达几十到上百公里的地表破裂带。近年来的研究表明一些地震并不受地表已知活动断裂的控制,也不形成相应的地表破裂。这种类型的地震常发生在活动褶皱和逆断裂带上。其特征为地震震源深部的断裂位移向上快速衰减,在接近地表处渐趋于零,不引起或只形成很小的地表断裂位移,地震时的地表变形以褶皱隆起为主。虽然这类地震中的个别震例可对应已知地表活动断裂,而更多的地震却发生在年轻的褶皱构造之下,是由位于褶皱之下深达数公里处的盲断裂(blind thrust)位移而形成的。如 1906 年新疆玛纳斯 8 级地震可能是沿北天山主逆冲断裂带发生的一次典型的盲断裂和“褶皱地震”<sup>[42]</sup>,本文提到的 2013 年芦山 7.0 级地震也是。

活断层探测一般通过地震勘探给出比较精确的断层位置,如果断层错断地层则较容易定位;倘若断层作水平剪切错动,地层在垂直方向没有差异,就大大增加了探测的难度和费用。另一方面,地震是断裂活动的最新表现形式之一。我国的数字地震台网全面布设,大量微小地震被记录,精确修订的

震源位置能够更清晰地揭示地震分布与构造活动的关系。万永革等<sup>[29]</sup>提出的震源断层拟合方法已经显示出优越性。本文给出的 3 个实例,针对不同的对象——存在争议的唐山大地震、1668 年的郯城 8  $\frac{1}{2}$

历史地震、2013 年盲断裂芦山 7.0 级地震,都能够得到可供参考的结果。实际上,在时间、空间上呈现丛集状态的小地震,都能够用于震源断层拟合,同时得到由震源机制解反演得到的区域应力场作用下的断层滑动方式<sup>[43-46]</sup>。哪怕以往没有发生过强地震、当地不存在已知断裂的条件下,或许能够揭示新破裂、判定新断层,进而预测未来强震活动的场所。尤其是芦山地震之后仅仅使用 1 h、2 h、16 h 的区域地震台网地震速报目录,也能够得到稳定的震源断层结果,这就有可能在地震应急期给出对于极震区的估计,提供救援决策参考使用,减少信息不完备时的盲目性。

当然震源断层方法假定大量地震均匀分布在震源断层两侧,相当于震源体的介质比较均匀、各向同性,严格来讲这种条件难以完全满足。只要这种差异没有严重影响到震源定位的精度,本文使用的方法就是可行的。而且该方法可以给出各个参数的误差,供使用时考虑,其中滑动角的误差有赖于区域应力场的可靠性,但是滑动角的意义非同小可,它给出在现今应力场作用下震源断层的错动性质,具有预测含义。如果存在对应的活动断层,可以作出相同的判断,使得断层真正“活动”起来。

### 参考文献:

- [1] 傅承义. 有关地震预告的几个问题[J]. 科学通报, 1963, 14(3): 30-36.
- [2] 马杏垣. 论伸展构造[J]. 地球科学, 1982, 7(3): 15-22.
- [3] Scholz H C. The mechanics of earthquakes and faulting[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 73-96.
- [4] Yeats R S, Sieh K, Allen C R. The Geology of Earthquakes[M]. New York: Oxford University Press, 1997: 1-568.
- [5] 高祥林, 罗焕炎. 大陆板内震源断层的特征[J]. 地震地质, 1992, 14(3): 259-264.
- [6] 张四昌, 赵军, 刁桂苓. 华北地区震源断层与深浅构造关系的初步研究[J]. 华北地震科学, 1995, 13(2): 1-10.
- [7] 周月玲, 尤惠川, 杨家亮, 等. 怀安盆地北缘断裂构造几何与活动特征[J]. 华北地震科学, 2016, 34(1): 47-52.
- [8] 李彬. 呼和浩特市主要活动断裂未来危险性评价——以大青山山前断裂为例[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 76-81.
- [9] 孟立朋, 冉志杰, 王燕, 等. 马村北断裂第四纪活动性勘探[J]. 华北地震科学, 2017, 35(1): 62-66.
- [10] 范强, 孟立朋, 周月玲, 等. 桐柏断裂活动时代研究[J]. 华北地震科学, 2017, 35(3): 20-26.
- [11] 刁桂苓, 张四昌, 赵军, 等. 用现今小地震研究历史强震的震源断层——以 1830 年河北磁县 7.1/2 级地震为例[J]. 地震地质, 1999, 21(2): 121-126.
- [12] 王东敏, 曲同磊, 肖兰喜, 等. 鲁北地区地震构造的新认识[J]. 华北地震科学, 2016, 34(4): 16-19.
- [13] 陈佳维, 崔效锋, 胡幸平. 唐山及周边地区中小地震重定位及其构造特征[J]. 华北地震科学, 2017, 35(1): 1-9.
- [14] 汤兰荣, 吕坚, 曾新福. 赣南及邻区的地震活动特征[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 82-88.

- [15] 汪一鹏. 关于“城市活断层探测与地震危险性评价工作大纲(试行)”的几点认识[J]. 地震地质, 2004, 26(4): 559–565.
- [16] 中国地震局. 中国地震活动断裂探测技术系统技术规程[M]. 北京: 地震出版社, 2005: 7–9.
- [17] 邓起东. 城市活动断裂探测和地震危险性评价问题[J]. 地震地质, 2002, 24(4): 601–605.
- [18] 邓起东, 卢造勋, 杨主恩. 城市活动断层探测和断层活动性评价问题[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 189–200.
- [19] 蔡玲玲, 杨歧焱, 郭秋娜, 等. 综合地球物理方法在地震安全性评价中的应用和成果[J]. 华北地震科学, 2016, 34(1): 21–29.
- [20] 赵建明, 申伟坤, 李明, 等. 秦皇岛地区地震活动特征及其未来地震危险性[J]. 华北地震科学, 2016, 34(1): 70–75.
- [21] 孟立朋, 彭远黔, 冉志杰, 等. 浅层地震勘探在工程选址中的应用及断层活动性鉴定[J]. 华北地震科学, 2016, 34(4): 20–27.
- [22] 郭慧, 王鑫. 河北隆尧现今地裂缝与 1966 年邢台地震关系[J]. 华北地震科学, 2017, 35(1): 10–16.
- [23] 杨柳. 邯郸市工程地质场地条件与地震动参数关系研究[J]. 华北地震科学, 2016, 34(4): 67–72.
- [24] 许洪泰, 王冬雷, 王华林, 等. 平邑县万庄塌陷地震现场调查及其成因[J]. 华北地震科学, 2017, 35(3): 79–83.
- [25] 宋秀青, 游秀珍, 刘芳, 等. 区域地壳速度模型对准确测定地震参数的重要性研究[J]. 华北地震科学, 2016, 34(2): 27–31.
- [26] 董非非, 邓辉, 郑斌, 等. “重复地震”在江西省及邻区测震台网定位精度评价中的应用[J]. 华北地震科学, 2016, 34(2): 73–78.
- [27] 杨波, 刘泽民, 隆爱军, 等. 遗传算法在提高非包围地震定位精度中的应用[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 43–47.
- [28] 王莉婵, 朱元清, 李雪英, 等. 河北地区地壳一维速度模型的新近研究[J]. 华北地震科学, 2016, 34(4): 1–10.
- [29] 冯向东, 王晓山, 陈婷, 等. 晋冀蒙交界地区最小一维速度模型[J]. 华北地震科学, 2017, 35(4)(待刊).
- [30] 王永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 793–804.
- [31] 聂永安, 姚兰予. 对活断层探测与评价中几个问题的思考[J]. 华北地震科学, 2003, 21(2): 1–6.
- [32] 李传友, 汪一鹏, 王志才. 中国东部城市地区隐伏断裂上断点与最新活动时代关系的初步分析——以邢台、唐山地震区为例[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 431–445.
- [33] 张素欣, 王晓山, 陈婷, 等. 唐山老震区 40 年地震时空演化特征分析[J]. 华北地震科学, 2017, 35(1): 32–37.
- [34] 刘保金, 曲国胜, 孙铭心, 等. 唐山地震区地壳结构和构造: 深地震反射剖面结果[J]. 地震地质, 2011, 33(4): 901–912.
- [35] 周翠英, 刁桂苓, 耿杰, 等. 1668 年郟城 8 1/2 大地震震源断层三维特征反演[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 2814–2824.
- [36] 赵朋, 姚大全, 杨源源, 等. 郟庐断裂带苏皖交界段活动特征初探[J]. 华北地震科学, 2016, 34(4): 54–59.
- [37] 王中彪, 王宁, 丁宁, 等. 郟庐带(南段)现今垂直运动及与地震关系[J]. 华北地震科学, 2017, 35(3): 66–72.
- [38] 张碧秀, 汤永安. 沂沭断裂带地壳结构特征[J]. 中国地震, 1988, 4(3): 16–22.
- [39] 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, 2013, 58: 1887–1893.
- [40] 徐锡伟, 于贵华, 王峰, 等. 1966 年邢台地震群的发震构造模型—新生断层形成? 先存活断层摩擦擦滑? [J]. 中国地震, 2000, 16(4): 364–378.
- [41] 代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 隐伏走滑断层破裂扩展特征的实验研究[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 635–645.
- [42] 张培震, 邓起东, 徐锡伟, 等. 盲断裂、褶皱地震与新疆 1906 年玛纳斯地震[J]. 地震地质, 1994, 16(3): 193–204.
- [43] 刘静, 董建辉, 陈婷, 等. 河北及邻区震源机制与构造应力场[J]. 华北地震科学, 2016, 34(3): 42–47.
- [44] 王晓山, 陈婷, 冯向东, 等. 邢台地震序列的应力释放调整过程[J]. 华北地震科学, 2017, 35(1): 17–23.
- [45] 李祥, 王永革, 崔华伟, 等. 2016 年 1 月 21 日青海门源 MS6.4 地震构造应力场[J]. 华北地震科学, 2016, 34(2): 36–41.
- [46] 李守勇, 孙晴, 晁福林, 等. 利用静态库仑应力触发准则确定地震断层[J]. 华北地震科学, 2016, 34(2): 67–72.

## The Application of Seismogenic Fault Method in Active Fault Detection

YANG Yaqiong<sup>1</sup>, FENG Xiangdong<sup>1</sup>, DIAO Guiling<sup>1</sup> and XU Xiwei<sup>2</sup>

(1. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China;

2. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The precisely relocated hypocenter of small earthquakes shows linear or zonal distribution, which can be used to determine the quantitative geometries of seismogenic fault by fitting a spatial plane through mathematical method and then to reveal the relationship between the earthquake spatial distribution and active tectonics. Using the seismicgenic fault fitting method, the geometries structure and motion mode of the seismogenic fault of the 1976 Tangshan  $M7.8$  earthquake, the 1668 Tancheng  $M8 \frac{1}{2}$  earthquake and the 2013 Lushan  $M7.0$  blind earthquake is determined, the parameters is relatively consist with researches of deep structure detections which shows that the seismicgenic fault fitting method has important significance to active fault detection.

**Key words:** active fault; seismicgenic fault fitting; Tangshan  $M7.8$  earthquake; Tancheng  $M8 \frac{1}{2}$  earthquake; Lushan  $M7.0$  earthquake