

刘双庆、高原、张磊等, 2014, 2012年天津宝坻2次有感地震的力学机制研究, 中国地震, 30(4), 514~522。

2012年天津宝坻2次有感地震的力学机制研究

刘双庆¹⁾ 高原²⁾ 张磊^{1,3)} 汪翠枝¹⁾ 马建英¹⁾

1) 天津市地震局, 天津市河西区友谊路19号 300201

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3) 中国矿业大学(北京), 北京 100083

摘要 利用地震仪器烈度分布、地震记录初动极性分布、近场地震序列 S_g 震相剪切波分裂特征、震中附近应变仪器记录及深井气氦记录等, 综合分析了宝坻地区 2012 年 M_s 4.0、 M_s 3.5 两次有感地震。研究发现, 这 2 次地震震级不大, 但孕震过程可能伴有地下介质应力状态的变化, 表现出震前半年北东东向加速压缩、北北西向拉张至 M_s 3.5 地震后该状态转缓的动态过程。2 次地震间隔期间地下积累应力疑似没有得到充分释放, 地下微裂隙局部调整使得该地深井观测的稀有气体出现高值, M_s 3.5 地震后微裂隙重新闭合, 稀有气体恢复背景值, 同时地震剪切波快波方位角恢复到北东东向的背景方向。震中区附近的形变、测震、流体等观测异常有一定的时空对应性。

关键词: 剪切波分裂 仪器烈度 初动极性 地震孕育过程

[文章编号] 1001-4683(2014)04-0514-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

继 2012 年 5 月 28 日唐山市区东部发生 M_s 4.8 地震后, 6 月 18 日、8 月 26 日在距离唐山 70km 的天津宝坻地区东部相继发生了 M_s 4.0、3.5 有感地震, 2 次地震震中间距 ≤ 15 km, 震中连线呈北东东向。虽然 2 次地震震级不大, 但北京城区、天津北部、河北玉田等地普遍有感。这 2 次地震震中位于 1976 年唐山 7.8 级地震玉田县低烈度异常区西边缘, 此处除 1976 年 8 月和 12 月发生 2 次 M_s 4.0 以上地震外, 1993 年、2003 年的 2 次有感地震都未超过 M_s 4.0, 并且同时期唐山断裂附近未有 M_s 4.5 以上地震发生, 其他时间段内该处地震震级都较小。2012 年宝坻的 2 次有感地震发生时间间隔比较短, 空间间距小, 震前半年, 距震中 20km 的位于井下 253m 白云岩层中的宝坻台体应变仪出现由压缩转为加速拉张的变化过程。2 次地震期间离震中 10km 的王 3 井(1072m 深井, 属奥陶纪灰岩层) 气氦出现多

[收稿日期] 2013-09-06; [修定日期] 2014-12-23

[项目类别] 中国地震局测震星火计划项目(XH14002Y)、骨干青年专项(20130202)、天津市国土局项目(1212011220232-5)、山东省局重点科研基金项目(JJ1309Y)联合资助

[作者简介] 刘双庆, 男, 1982 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 地震波监测与信号分析。

E-mail: goodmorningabc@163.com

批次显著逸出现象。这 2 个显著前兆观测异常是否与这 2 次地震有关? 是否反映了同一个动力过程? 对这 2 个有感地震的前兆判定是否可信? 这些都需要给予细致探讨。事实上, 历史地震震例分析及岩石物理实验都支持地震前发生的前兆异常之间具有某种统计优势分布特征和物理机理联系。姚孝新(1976)、陈颀(1977) 等通过玻璃与岩石破裂实验发现, 在主破裂发生前存在微破裂与声发射现象, 其中不同的应力加载路径或介质内部是否存在先期裂隙对破裂过程有重要的影响。差应力变化条件下大理岩的破裂临界状态的剪切波分裂研究也表明, 岩石破碎(崩溃)前存在裂隙生长, 而观测到的剪切波分裂特征的变化反映了差应力的变化(高原等, 1999; 高原, 2000)。而主震前震中区附近地区波速比异常可能来源于地壳内部的微裂隙开合过程(冯德益等, 1976; 龙海英等, 2011)。对比大地测量资料反演与地震波形反演的结果则显示, 唐山 7.8 级地震前可能已经发生了比主震规模还要大一些的无震滑动(陈运泰等, 1979)。因此, 本文拟利用近场地震序列 S_g 震相剪切波分裂技术, 结合地震记录初动极性分布、地震仪器烈度分布特征等, 并利用前人已有的研究成果, 对宝坻这 2 次有感地震的力学机制进行分析, 探讨 2 次地震的孕育、发展、发生、结束过程。

1 局部构造力学背景

天津宝坻这 2 次地震所发生的区域, 位于华北平原拗陷带北段与阴山-燕山南缘断裂带东段的结合部, 其中华北平原拗陷带新生代以来地壳强烈下沉, 局部地区形成了 10000m 厚的堆积物。燕山南缘断裂带除具张性外, 还兼有左旋扭动性质(国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982)。2 个地震位于宝坻、蓟运河 2 级断裂交汇处以西(图 1 中 E_2 、 E_3), 宝坻断裂为断面倾向南的倾角较陡的正断裂。蓟运河断裂为唐山块陷和沧县块隆的分界线, 第四纪时断裂东北盘抬升, 西南盘下降, 断裂两盘第四系底界落差大于 100m。在浅层的蓟运河断裂下方, 有宝坻-宁河地壳基底断裂, 两者在平面位置和延长方向上基本一致。这是一条较大的北西向地壳基底断裂, 根据穿过该断裂的塘沽-密云人工地震测深剖面数据判定, 该断裂从地壳基底一直断到地壳上部, 断距 3~4km, 为正断层, 西南盘下降, 与浅层的蓟运河断裂产状基本一致(国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982)。据许忠淮(2001)给出的 1966~1999 年该地区 M_s 4.0 以上地震的震源机制解可知, 该区域主要表现为走滑型地震, 主压应力轴为北东东向, 主张应力轴为北北西向(图 2(a))。而基于地壳各向异性推断的首都圈地区地壳主压应力方向为 85.7° , 为北东东至近东-西方向(高原等, 2008)。图 2(b)、(c) 为高原等(2010)利用 SKS 分裂和近震 S_g 分裂获取的首都圈地区的快波偏振方向, 从中可以看出穿透壳幔深度的快波优势方向偏向南东东, 平均值为 111.2° , 而上地壳快波优势方向接近东西, 平均值为 95.1° 。

2 两次地震前后的观测异常特征

2.1 S_g 剪切波分裂快波方向变化

剪切波分裂又称为剪切波双折射, 指横向偏振的剪切波在通过某种形式的有效弹性各向异性固体传播时分裂成 2 个近似互相垂直的偏振震相。这 2 个分裂的震相具有不同的传播速度和不同的振动方向, 这就意味着它们在粒子运动偏振图上会有特征性的差别, 并且快剪切波偏振近似平行于裂隙面, 慢剪切波偏振近似垂直于裂隙面。由于本文使用 S_g 震相

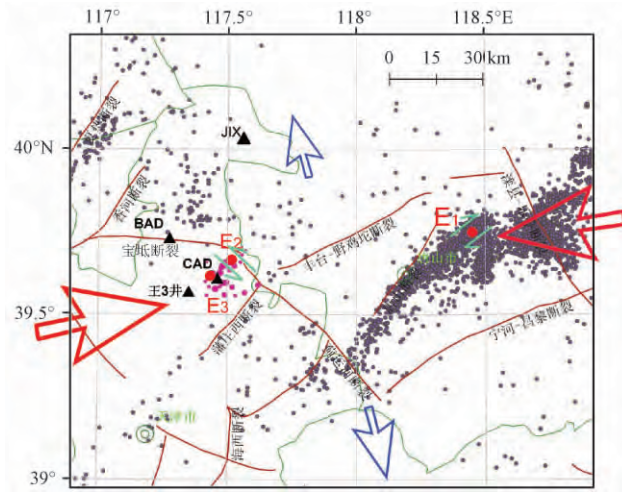


图1 研究区断裂及地震分布。 E_1, E_2, E_3 为本文强调的3次地震;洋红色点为CAD台站剪切窗口内地震;空心大红箭头表示挤压蓝箭头为拉张(断裂数据引自邓起东等(2003)的结果)

(地壳内直达剪切波)进行分析,要求射线出露地表时的入射角需小于导致平面波出现严重非均匀相移的临界角,这个角度对于无限半空间泊松体模型约为 35° 。本文利用田玥等(2005)给出的多层模型射线追踪算法(该算法利用射线穿越各层的速度比来提高射线追踪的稳定性),并在滕吉文等(1979)的速度结构模型的基础上增加近地表速度模型(沈伟森等,2010),计算得出震源深度10km、震中距15km的地震地表入射角小于 30° ,特别因华北地区地表还存在低速覆盖层,因此实际入射角可能更小。本文分析的地震样本为图1中 E_2, E_3 附近的洋红色点,时间从2008年1月~2013年5月,共39条($M_L \geq 0.5$ 地震记录完整),CAD台的震中距 $< 15\text{km}$,呈丛集性分布并满足剪切波分裂窗口的要求。利用SAM软件(高原等,2010)中的偏振分析法,获取的39个地震的快剪切波比慢剪切波快10~40ms且主要集中在20ms,快波方位角 75° 左右(整体均值为 85.4° ,中位数为 80° ,众数为 70° ,标准差为 28.8°),显示为北东东向(图3(e))。图3(a)、(b)为2012年6月18日03时17分 $M_L 1.9$ 地震事件CAD台记录的快慢剪切波及偏振特征(采样率为100sps),两水平分量旋转后,快慢波成分得到有效分离。图3(c)、(d)为另一个事件,即2012年5月31日03时13分 $M_L 1.3$ 地震事件的分析结果。图3(e)中的标号1、2、3竖线分别为唐山 $M_s 4.8$ 、宝坻 $M_s 4.0$ 、3.5有感地震发震时刻。图中显示,在3次地震前3个月,该地区的小震剪切波快波方向与统计平均值出现

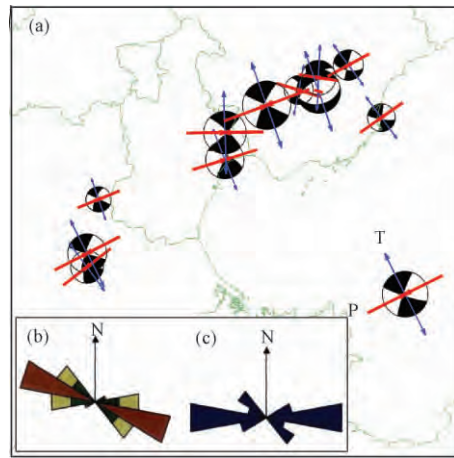


图2 (a) 区域历史地震震源机制;P、T轴水平投影;(b) SKS反映的剪切波方向;(c) Sg直达剪切快波方向

时间从2008年1月~2013年5月,共39条($M_L \geq 0.5$ 地震记录完整),CAD台的震中距 $< 15\text{km}$,呈丛集性分布并满足剪切波分裂窗口的要求。利用SAM软件(高原等,2010)中的偏振分析法,获取的39个地震的快剪切波比慢剪切波快10~40ms且主要集中在20ms,快波方位角 75° 左右(整体均值为 85.4° ,中位数为 80° ,众数为 70° ,标准差为 28.8°),显示为北东东向(图3(e))。图3(a)、(b)为2012年6月18日03时17分 $M_L 1.9$ 地震事件CAD台记录的快慢剪切波及偏振特征(采样率为100sps),两水平分量旋转后,快慢波成分得到有效分离。图3(c)、(d)为另一个事件,即2012年5月31日03时13分 $M_L 1.3$ 地震事件的分析结果。图3(e)中的标号1、2、3竖线分别为唐山 $M_s 4.8$ 、宝坻 $M_s 4.0$ 、3.5有感地震发震时刻。图中显示,在3次地震前3个月,该地区的小震剪切波快波方向与统计平均值出现

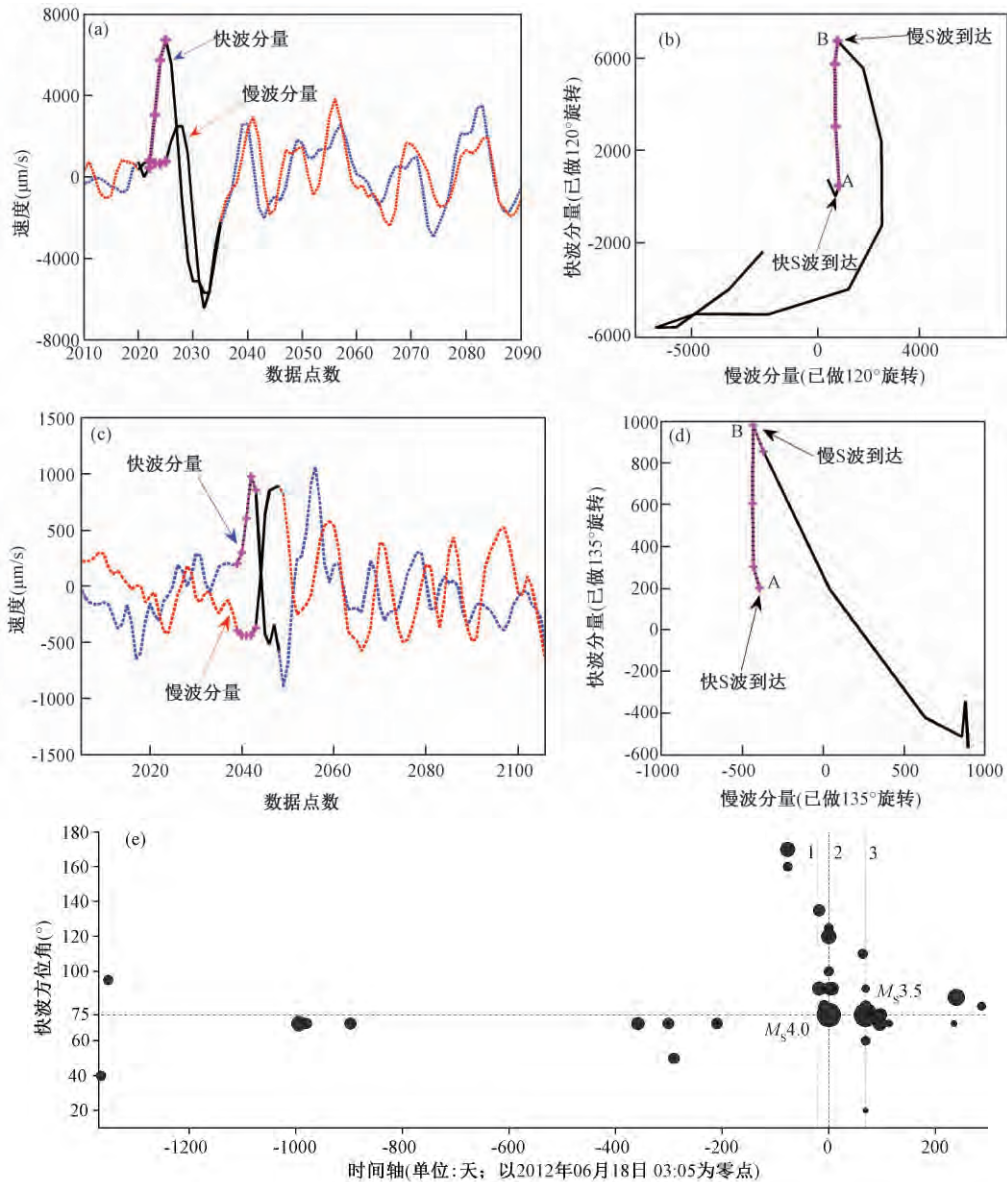


图3 (a)、(b)为2012年6月18日03:17分地震事件快慢波显示。其中(b)图的A-B段对应(a)图中加了“+”的线段,显示快波先到成分;(b)图的实迹线由(a)图中的2条实迹线绘制。(c)、(d)为2012年5月31日03:13分地震事件快慢波显示;其中(d)图的A-B段对应(c)图中加了“+”的线段;(d)图的实迹线由(c)图中的2条实迹线绘制。(e)为地震序列S_g快波方位角分布。其中实心圆大小表示不同震级;标号1、2、3为文中所指的3次有感地震发震时刻

明显差异, M_s 3.5地震前基本上都是向大角度偏离,而 M_s 3.5地震后,余震的快剪切波偏振方向与平均方向差异减小,基本恢复到背景方向。这个过程可能显示了2012年唐山 M_s 4.8地震前几个月到2012年8月底,在研究区的局部范围内,地下裂隙总体方向出现由北东东

方向转向东西及南南东向,之后又很快恢复的过程。

2.2 震中区体应变及气氦显著异常

距离2次地震震中约20km的BAD台站(图1)体应变仪和王3井深井气氦分别在震前和发震期间出现显著异常,经多次现场落实、样本重复采样检测并与台站人员核实干扰情况后,认定异常存在。体应变从2008年6月呈长趋势压性变化,累计压缩量约0.00012(图4中B段),至2011年3月11日日本 M_s 9.0地震后,趋势转平。2011年末开始出现持续拉张,2012年3~4月份有拉张加速现象(不同于往年同期曲线抬升形态),拉张累计量约0.00015(图4中D段)。5月底发震(图4中 E_1 、 E_2 、 E_3 分别对应 M_s 4.8、4.0、3.5等3次地震),震后曲线趋势转平(图4中 A_2 段)。1072m王3深井在2012年7月初开始出现气氦增强式逸出,增大的峰值约为0.025%,持续到7月底(图5)。8月初~9月上旬气氦背景曲线有较大的波动,可能受7月下旬~8月中旬长时段强降雨影响(图5)。上述2种观测手段都表现出张性,其中体应变异常发生在主震前,气氦显著逸出异常出现在3.5级地震前。另外,距离4.0级地震震中以北40km的蓟县台站(图1中JIX台)水平摆NS向整点值在2012年3月8日、5月19~20日、8月1~2日分别出现62、66、64ms类似阶跃特征的明显固体潮畸变(图6)。经4阶demy小波函数分解取低频成分后,再经坐标旋转到蓟运河断裂的垂直与平行分量上,可明显看出2个分量的异常变化是同步的。特别是“异常起伏3”的变化与往年同期强降雨会导致连续曲线下降不同,该变化发生在下降过程的中途。经核查,其间仪器工作正常。这些异常起伏特征表现为以JIX台点为分界点,东南部相对西北部有抬升变化。

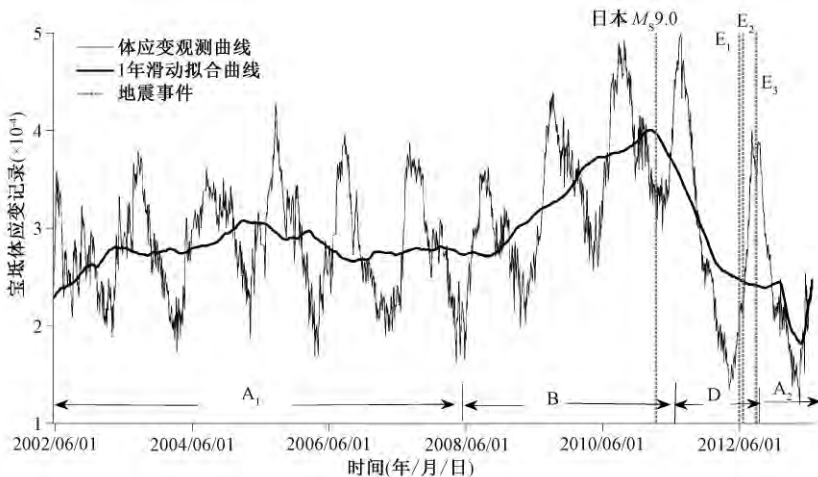


图4 宝坻体应变原始记录(纵轴值向上为压缩)

3 两次地震发震过程

3.1 基于测震台网数据得到的震源机制

前文提及的3次有感地震在天津强震动台网都获得加速度记录(强震动台网含110个强震台,平均台间距约14km,采样率200sps),4.0级地震获35个台良好数据记录,利用日

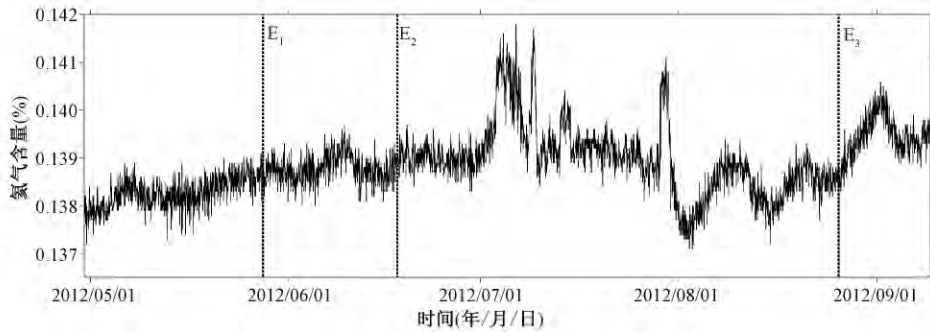


图5 宝坻王3井气氮原始记录曲线

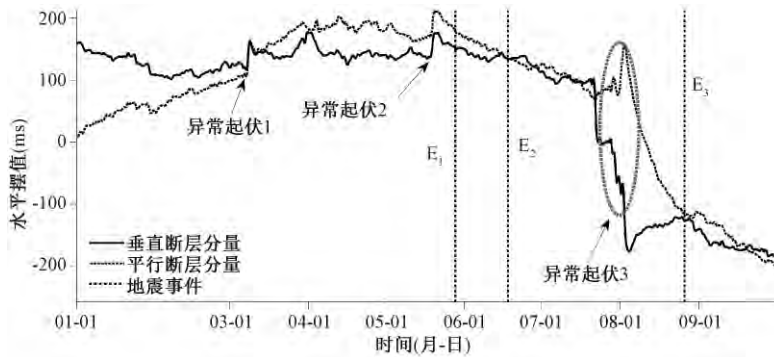


图6 蓟县(JIX)台站水平摆整点值

本同行常规的处理方式(刘双庆等, 2012),对两水平通道的加速度记录搜索出各自的绝对加速度域值,要求大于该域值的记录点数为 20 个,以克服仪器脉冲异常及保证计算结果相对稳定。将两水平通道的域值求平均,并利用烈度参考表内插出仪器烈度(图 7(a))。天津测震速报台网含首都圈部分台站共 138 个台,平均间距约 35km(天津台网台间距更小些),记录到清晰初动的台站分布见图 7(b)、(c),其中实心点初动向上。为避免地壳速度模型以及本地区井下短周期仪器带宽对体波震源机制反演的影响,本文参考郭增建(1958a、1958b)给出的震源机制作图法,直接给出地表面初动分布结果及极性分界线。结果显示宝坻 2 次地震的 4 象限分布非常明显,震源机制基本一致,考虑该地断层倾角较陡,故 2 次地震都是倾角较陡的走滑型地震。 M_s 4.0 地震仪器烈度显示北西向为烈度长轴方向,即地震主破裂方向为北西,左旋走滑。 M_s 4.8、 M_s 3.5 地震的处理过程一样,不再赘述。其中 M_s 4.8 地震为北东东向破裂,右旋走滑(图 1 中 E_1 、 E_2 的单肩箭头)。 M_s 3.5 地震主破裂方向为北西,左旋走滑。

3.2 地震发震过程分析

以上震源机制分析表明,4.8 级地震与 1976 年 7.8 级地震的震源机制(王景明,1990)基本一致。唐山断裂的右旋与蓟运河断裂的左旋显示 2012 年的 3 次地震产生的效应为:以唐山断裂延长线以及宝坻-蓟运河断裂延长线交错的 4 象限分布区,北南 2 区拉张,东西 2 区压缩(图 1)。除 1976 年连续发生 2 次 M_s 4.0 以上地震外,本区地震的发生相对孤立且震

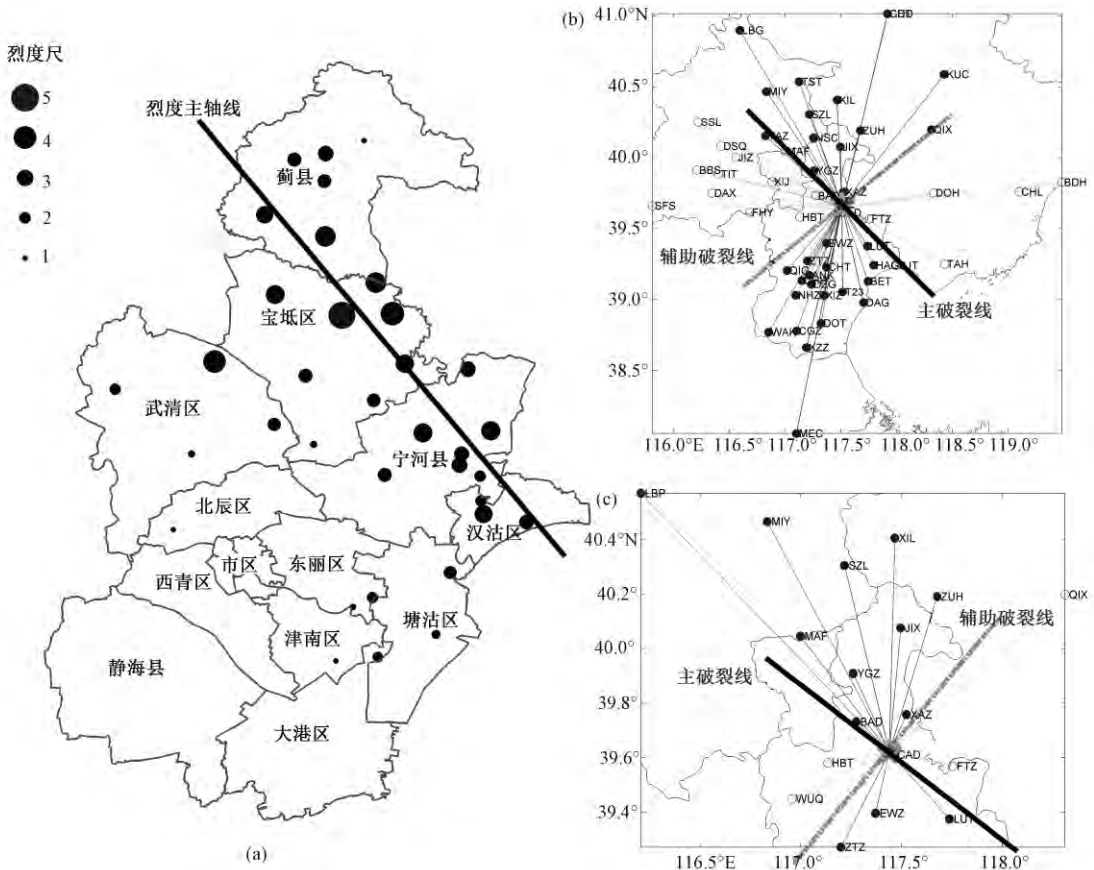


图7 宝坻 M_s 4.0 地震仪器烈度分布 (a) 及 M_s 4.0 (b)、(c) 地震的清晰初动分布
(b)、(c) 图中实心点初动朝上

级较小。而 2012 年的 2 次有感地震与 5 月 28 日的唐山 4.8 级地震在时间上非常靠近，空间上相距不超过 80km，这 3 次地震似乎表现为受同一背景应力场作用的应力释放特征。由于东西走向的宝坻断裂以正断为主，南部保持继承性沉降，而北部可出现恢复性抬升。

但是，受该区域 Moho 面起伏及局部硬包体(周硕愚等，1997)的影响，即使假定应力边界条件具有定常特征(梅世蓉等，1989)，东西向压缩形变过程仍存在步进式的可能。从 S_g 分裂的快波分裂角度变化显示，4.0 级地震前半年，该区域的地下微裂隙主优势方向有向东南偏转的趋势，并与地壳下层的深断裂走向及 SKS 计算的结果趋近。这可能显示出在东西向压应力的作用下，深部断裂局部出现一定程度的“活化”，即南南东向蓟运河深部断裂西南盘左旋南倾，并诱使浅部裂隙出现转向的现象。这些变化与 BAD 台体应变、JIX 台水平摆 2 分量的变化相互对应。4.0 级地震后至 3.5 级地震前，该区域的小震 S_g 分裂方向仍大于背景方向，即东西向压缩、南北向拉张的增强的趋势没有减弱，再进一步受到 4.0 级地震的同震影响，王 3 井深井气氦出现多批次高值异常现象是可以解释的。宝坻这 2 次地震初动 4 象限极性分布也与体应变、气氦、水平摆的变化相协调，显示这 2 次地震是应变变化过程中的极端突变情况。3.5 级地震后， S_g 分裂方向减弱，地下微裂隙主优势方向恢复到北东东

向;该区域东西向压缩和南北向拉张的加速现象弱化,气氦终止快速逸出;体应变、气氦、水平摆进入背景缓变过程。

因此,从2011年底本区域疑似出现了一次地下微裂隙分布主方向偏转的过程,直到2012年9月结束,其间发生了3次有感地震,并出现了相应的观测异常。由于3次地震震级较小,时空间隔很近,位错模式相互兼容,震前剪切波快波偏振方向趋向深部断裂性质,似可稍作进一步推论如下:唐山断裂与蓟运河断裂一定程度上受到深部断裂的控制,2条断裂的自身断裂面相对平滑,近期可孕育强震的硬包体特征表现不明显。但唐山断裂与蓟运河断裂的交汇处,可能成为局部应力的承载点,1976年11月15日 M_s 6.9、1977年5月12日 M_s 6.2即发生在此处。

4 结语

本文通过对测震、形变、流体观测手段的记录进行了分析,分析结果在一定程度上表明虽然它们各自记录宝坻2次有感地震的不同侧面的信息,但却具有较好的对应性。 S_g 剪切波分裂显示,震前半年东西向压应力增大,地下微裂隙向东南向偏转,出现与宝坻-宁河地壳基底断裂走向趋近的趋势,地震后该趋势消失。不同手段间的彼此印证,进一步显示了在距震中30km左右的形变观测只要观测场地与发震断裂有关联,则形变观测手段对强有感的小震级(M_s 4.0左右)地震也有一定的前兆指示意义。

考虑受到观测仪器质量性能及对往次震例检验的影响,本文仅抽取了前兆观测手段中形变、地下流体某些测项的显著异常进行分析,以突出测项的可信度。 S_g 剪切波分裂的分析受剪切波非均匀相移窗口的限制,同时因这2次宝坻地震震中区历史地震较少,特别是近4年的地震数量太少,故对快波分裂计算结果的整体质量估计有一定影响。

总体而言,2012年宝坻2次有感地震仍表现为北东东向背景应力场加载过程中的应变突跳(蠕滑-拉裂-剪断)现象,唐山4.8级地震及这2次地震是一次由东向西迁移,呈现了震中以南区域在震前加剧拉张,至3.5级地震后拉张趋势弱化的过程。

致谢:湖北省地震局赵凌云和安徽省地震局洪德全在SAM软件操作过程中提供了帮助;中国地震台网中心薛艳博士对论文撰写提出了宝贵建议。

参考文献

- 陈颢, 1977, 声发射技术在岩石力学研究中的应用, 地球物理学报, **20**(4), 312~321。
- 陈运泰、林邦慧、王新华等, 1979, 用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式, 地球物理学报, **22**(3), 201~217。
- 邓起东、张培震、冉勇康等, 2003, 中国活动构造与地震活动, 地学前缘, **10**(特刊), 66~73。
- 冯德益、郑斯华、盛国英等, 1976, 我国西部地区一些强震及中强震前后波速异常的初步研究(一)——波速比异常, 地球物理学报, **19**(3), 196~205。
- 高原、李世恩、周蕙兰等, 1999, 大理岩的剪切波分裂对差应力变化响应的实验研究, 地球物理学报, **42**(6), 778~784。
- 高原, 2000, 破裂临界状态下大理岩的剪切波分裂特征, 中国地震, **16**(3), 197~202。
- 高原、吴晶, 2008, 利用剪切波各向异性推断地壳主压应力场——以首都圈地区为例, 科学通报, **53**(23), 2933~2939。
- 高原、吴晶、易桂喜等, 2010, 从壳幔地震各向异性初探华北地区壳幔耦合关系, 科学通报, **55**(29), 2837~2843。
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982, 一九七六年唐山地震, 71~130, 北京:地震出版社。

- 郭增建, 1958a, 由地震波初动求断面方法的一些推广和改进, 地球物理学报, **7**(1), 20 ~ 29。
- 郭增建, 1958b, 由地震波初动求断面方法的一些推广和改进(续), 地球物理学报, **7**(2), 91 ~ 97。
- 梅世蓉、梁北援, 1989, 唐山地震孕震过程的数值模拟, 中国地震, **5**(3), 9 ~ 17。
- 刘双庆、聂永安、高武平等, 2012, Matlab 在天津市强震动台网烈度速报中的应用, 西北地震学报, **34**(4), 405 ~ 412。
- 龙海英、聂晓红、唐兰兰, 2011, 新疆和静 5.6 级地震前波速比异常震例分析, 中国地震, **27**(2), 147 ~ 154。
- 王景明, 1990, 唐山地震与全新世构造应力场, 地震学报, **12**(3), 274 ~ 241。
- 沈伟森、罗艳、倪四道等, 2010, 天然地震频率范围内首都圈地区近地表 S 波速度结构, 地震学报, **32**(2), 137 ~ 146。
- 田玥、陈晓非, 2005, 水平层状介质中的快速两点间射线追踪方法, 地震学报, **27**(2), 147 ~ 154。
- 滕吉文、姚虹、周海南, 1979, 北京、天津、唐山和张家口地区的地壳结构, 地球物理学报, **22**(3), 218 ~ 236。
- 许忠淮, 2001, 东亚地区现今构造应力图的编制, 地震学报, **23**(5), 492 ~ 501。
- 姚孝新, 1976, 破裂速度和地震, 地球物理学报, **19**(2), 118 ~ 124。
- 周硕愚、施顺英、帅平, 1997, 唐山地震前后地壳形变场的时空分布、演化特征与机理研究, 地震学报, **19**(6), 559 ~ 565。

Study on the mechanical process of 2 noticeably felt earthquakes in Baodi County, Tianjin in 2012

Liu Shuanqing¹⁾ Gao Yuan²⁾ Zhang Lei^{1,3)} Wang Cuizhi¹⁾ Ma Jianying¹⁾

1) Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3) China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract In terms of the instrument intensity distribution, first impulse orientation of seismic velocity records, Sg shear wave split characteristics of a serial of near-regional earthquakes and records of strain and helium gas in deep holes nearby epicenter, we discuss two noticeably felt earthquakes of $M_s 4.0$ and $M_s 3.5$ in Baodi County in 2012 and reveal some gestation traits of these earthquakes. Although the magnitudes of 2 earthquakes are a little small, some stress changes may appear in the crust in seismogenic process, in the form of an accelerated NEE orientation pressure and NNW dilation half a year before main earthquake. These states alleviated after $M_s 3.5$. In the time interval between two earthquakes, the regional underground accumulated stress may not be fully released. The state change of local underground micro-cracks led to record more deep rare gas. After $M_s 3.5$ micro-cracks closed again, the polarization azimuth of seismic quick shear wave returned to the NEE direction. In the near epicenter region, the abnormal characteristics of strain record, seismogram and deep hole liquid had a certain consistence of observation in time and space.

Key words: Shear wave split Instrument intensity First impulse orientation
Seismogenic process