

河北易县 $M_L3.8$ 、 3.3 地震同震形变响应及其震源机制

马 栋¹, 冯向东¹, 张素欣¹, 王晓山¹, 李均良², 王 想¹

(1. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 2. 河北省地震局 易县地震台, 河北 易县 074211)

摘要:2010年7月30日河北省易县相继发生 $M_L3.8$ 、 3.3 地震,震中距离易县地震台仅 7 km,震中附近主要以形变观测台站为主。虽然地震震级相对较小,但是 12 个形变测项均有不同程度的同震响应,这在中小地震的同震响应分析中是较为突出的震例。根据河北台网的地震波形资料对地震进行了重新定位。根据速报震中和重新定位震中分别计算两次地震的震源机制,震源断层初步断定为 NEE 向断层,断层表现为正断兼右旋走滑。

关键词: 同震形变响应; 中小地震; 震源机制; 地震重新定位

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)04-0386-06

Co-seismic Deformation Response and Focal Mechanism Solution of Yixian $M_L3.8$ and $M_L3.3$ Earthquakes in Hebei Province

MA Dong¹, FENG Xiang-dong¹, ZHANG Su-xin¹, WANG Xiao-shan¹, LI Jun-liang², WANG Xiang¹

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;

2. Yixian Seismic Station, Hebei Yixian 074211, China)

Abstract: On July 30, 2010, $M_L3.8$ and $M_L3.3$ earthquakes occurred in Yixian, Hebei province. The epicenters were located about 7 kilometers from the Yixian seismic station. The stations around the epicentres mainly are deformation stations. Although magnitude of Yixian earthquakes are small, but there were co-seismic responses in 12 observation items, that is outstanding case for moderate-small earthquakes. The earthquakes are relocated according to seismic waveform data from seismic network of Hebei province. The focal mechanism solutions according to both the rapid report directory and the relocation result. The trends of focal fault of two earthquakes are NEE, and the nature of the fault are positive and right-lateral strike-slip.

Key words: Co-seismic deformation response; Moderate and small earthquakes; Focal mechanism solution; Earthquake relocation

0 引言

2010年7月30日22时21分、22时42分,在河北省易县相继发生了 $M_L3.8$ 、 3.3 地震,震中分别为: 115.35°E 、 39.42°N 和 115.35°E 、 39.41°N (重新定位结果)。两次地震距易县地震台仅 7 km,易县台的形变测项有明显同震响应,周边的赤城台、怀来台、天津蓟县台也有不同程度的同震形变响应。连续两次 3 级地震对 200 km 范围内的形变观测造成

同震响应,这在中小地震的同震响应方面属于特殊地震事件。本文对同震形变响应的性质、幅度及其产生原因进行分析,研究形变测项的同震响应能力;结合地震波形资料,计算震源机制解,并通过震源球面投影、震中地震地质构造,分析有同震响应的台站、无同震响应的台站与断层错动的联系。

这两次 3 级以上地震虽然属于中小地震,但由于其发生的地理位置特殊,属于首都圈重点监视地

收稿日期: 2010-09-09

基金项目: 中国地震局震情跟踪合同制定向工作任务(2010020703); 河北省科技支撑计划(09276904D)

作者简介: 马 栋(1979—),男(汉族),内蒙林西人,河北省地震局工程师,主要从事地壳形变与地震预测方面的研究。

区,震中周围易县伸缩仪、张家口伸缩仪、阳原水平摆倾斜仪等存在变化。因此充分分析这两次地震的震源机制、同震形变响应,对于判断该区震情的后续发展具有意义。

1 震中周围地震活动概况

易县地震发生在涑水断裂附近,震中 50 km 范围历史上共记录 5 级以上地震 3 次,即 1138 年 8 月 22 日河北易县 5.5 级地震、1658 年 2 月 3 日河北涑水 6.0 级地震和 1923 年 9 月 14 日河北新城 5.5 级地震,最近 1 次 M_L 3.0 以上地震是 1993 年 1 月 6

日河北涑源的 M_L 3.1 地震。1057—1970 年震中 100 km 范围内历史地震:5.0~5.9 级地震 10 次,6.0~6.9 级地震 4 次,7.0 级地震 1 次;1970—2010 年震中 100 km 范围内地震情况:3.0~3.9 级地震 41 次,4.0~4.9 级地震 5 次,5.0~5.9 级地震 1 次(图 1)。2008 年 1 月—2010 年 7 月,易县台记录到易县地区 0 级以上地震共计 11 次,其中 M_L 0~0.9 地震 4 次, M_L 1.0~1.9 地震 4 次, M_L 2.0~2.9 地震 1 次, M_L 3.0~3.9 地震 2 次。

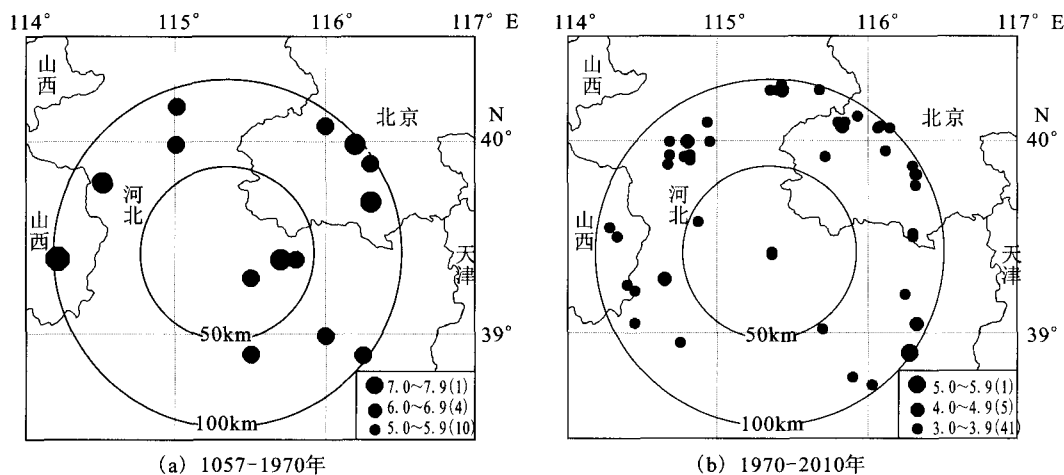


图 1 易县周边震中分布图(1057—2010)

Fig. 1 Distribution of earthquake epicenters in Yixian and around region(1057—2010).

2 同震形变响应与地震波形资料对比分析

2.1 同震形变响应情况

震中附近电磁和流体的测项较少,只有部分形变测项对这两次地震有较好的同震响应(图 2)。本文收集了河北省、天津市、北京市、山西省的定点形变资料,其中北京市的形变测项对易县地震无同震响应,主要原因是对于中小地震垂直摆倾斜仪的同震形变响应较为明显,而北京市的定点形变测项中垂直摆倾斜仪的测项较少;山西省的形变测项如代县、太原距震中 200~300 km,对易县地震均无同震形变响应,其中只有临汾台有垂直摆倾斜仪测项(距震中 498 km),由于距离较远,也未能记录到同震形变响应;天津市蓟县台距震中 201 km,蓟县垂直摆倾斜仪 NS 向对易县地震有同震响应。

河北省的同震形变响应测项共计 12 项,分别为易县四分量应变仪第 2、3、4 分量、易县垂直摆倾斜仪 EW、NS 向、易县水管倾斜仪 EW 向、赤城垂直摆

倾斜仪 EW、NS 向、怀来垂直摆倾斜仪 EW、NE、NS 向、怀来水管倾斜仪 NS 向。同震响应项数占全省形变测项的 16%,主要集中在距震中较近的易县台、赤城台、怀来台,其他台站测项无明显的同震响应。同震形变响应测项主要集中在垂直摆倾斜仪(7 项),其次是四分量应变仪(3 个分量),另外还有水管倾斜仪(2 项);而伸缩仪、体应变仪、水平摆倾斜仪均无明显的同震响应。按照仪器类别分析,有同震响应的同类测项占全省该类测项的百分比为:垂直摆倾斜仪 39%、四分量应变仪 75%、水管倾斜仪 13%。图 3 为易县垂直摆倾斜仪分钟值曲线,有较大幅度的同震阶变。

分量应变仪的同震响应持续时间为 2 分钟,垂直摆倾斜仪的同震响应持续时间为 2~10 分钟,水管倾斜仪的同震响应持续时间为 2~3 分钟。由于这两次地震震级较小,能量释放引起的地震动较弱,因此同震响应持续时间较短。与远震大震所表现的同震形变波^[1-2]不同,易县地震的同震形变响应主要表现为突跳和阶跃,其中分量应变仪表现为突跳,垂

直摆倾斜仪和水管倾斜仪主要表现为阶跃(表 1)。

表 1 易县 M_L3.8、3.3 地震同震形变响应统计表

测项	方向	起始时间	结束时间	持续时间/min	幅度	倾斜方向	类型	震中距/km
易县四分量应变	2 分量	22:42	22:44	2	1.8×10^{-9}		突跳	7
	3 分量	22:21	22:23	2	1.2×10^{-9}		突跳	7
		22:42	22:44	2	2.3×10^{-9}		突跳	7
	4 分量	22:42	22:44	2	4.9×10^{-9}		突跳	7
易县垂直摆	EW	22:21	22:24	3	$-2.05\times10^{-1''}$	W 倾	同震阶变	7
	NS	22:21	22:24	3	$-5.57\times10^{-2''}$	S 倾	同震阶变	7
易县水管	EW	22:21	22:24	2	$-1.1\times10^{-3''}$	W 倾	同震阶变	7
赤城垂直摆	EW	22:21	22:23	2	$-1.25\times10^{-2''}$	W 倾	同震阶变	171
		22:43	22:46	3	$-9.4\times10^{-3''}$	W 倾	同震阶变	171
	NS	22:21	22:23	2	$-1.74\times10^{-2''}$	S 倾	同震阶变	171
		22:43	22:46	3	$-1.9\times10^{-3''}$	S 倾	同震阶变	171
怀来垂直摆	EW	22:21	22:31	10	$6.8\times10^{-3''}$	E 倾	同震阶变	103
		22:43	22:51	8	$1.4\times10^{-3''}$	E 倾	同震阶变	103
	NE	22:21	22:27	6	$2.4\times10^{-3''}$	NE 倾	突跳	103
	NS	22:21	22:24	3	$-6.9\times10^{-3''}$	S 倾	同震阶变	103
怀来水管	NS	22:21	22:24	3	$-8.0\times10^{-4''}$	S 倾	同震阶变	103
蔚县垂直摆	NS	22:21	22:27	6	$9\times10^{-4''}$	S 倾	同震阶变	201

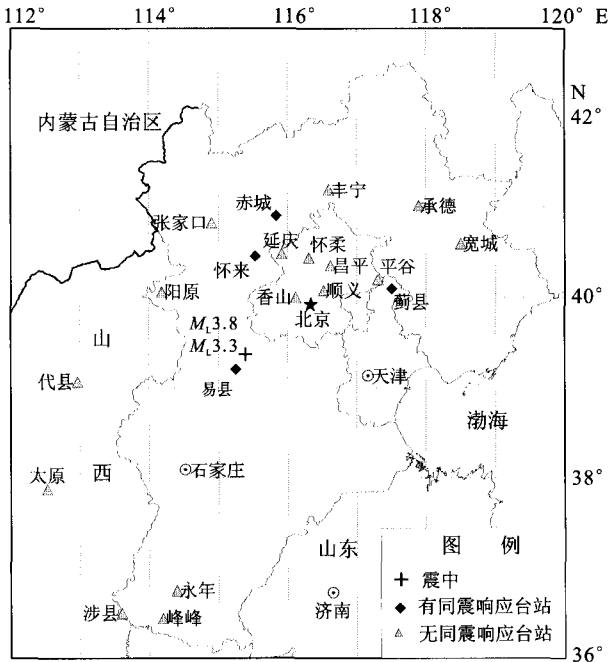


图 2 易县地震震中附近形变台站分布图

Fig. 2 Distribution of the deformation observatory stations in the study area.

无同震形变响应的测项,主要有以下三方面的因素:一是受仪器灵敏度的限制,未能对微小地震动做出响应;二是震中距较大;三是部分测项在短时间内受到了气压等因素的干扰,同震响应湮没在噪声中,难以对其分析识别。

虽然易县四分量应变仪、垂直摆倾斜仪较其他台站同类测项的同震响应幅度偏大,但表 1 中的同震响应幅度与震中距并无较好的线性统计关系,甚

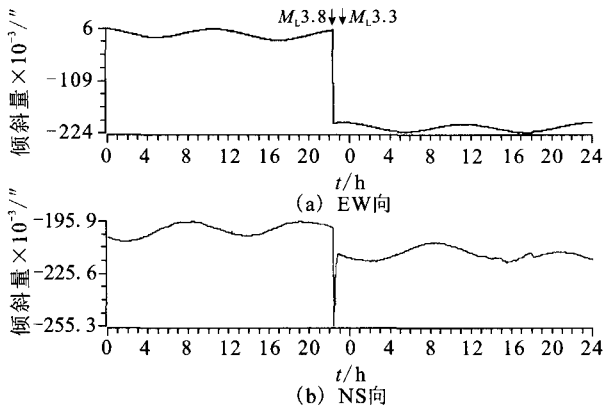


图 3 2010 年 7 月 30—31 日易县垂直摆倾斜仪分钟值曲线图

Fig. 3 Minute value curves of vertical pendulum from July 30 to July 31, 2010, in Yixian station.

至出现相反的情况。这是由于近震面波持续时间短,同震形变波一般难以记录到准确的最大幅度值^[2-5]。远场大震以弹性形变为主,同震形变响应表现为形变波,震后恢复到震前的状态和水平;近场中小地震主要以塑性形变为主,引起的同震形变响应表现为同震阶跃,之后形成台阶,未能完全恢复至震前水平。

2.2 同震形变响应与地震波形资料对比分析

两次地震有两次对应同震响应的测项有:易县四分量应变仪的第 3 分量、赤城垂直摆倾斜仪 EW、NS 向、怀来垂直摆倾斜仪 EW 向;其余测项主要是对易县 M_L3.8 地震有同震响应,而对易县 M_L3.3 地震无同震响应。主要因素有两个:其一是易县 M_L3.8 地震同震响应之后,两次地震间隔时间短,

仪器处于调整阶段,未能对之后的易县 $M_L3.3$ 地震产生同震响应;其二是受仪器灵敏度、震源深度、震级大小等的影响。

同震阶变是仪器记录到的地震期间地球应变场的一种准静态调整,地震发生时,孕震体释放能量,震源区应变场的调整是应力应变的传递,震源区外不能直接记录到震源区的应变调整,只能记录到通过地震动使得各地应力场的调整^[6-9]。易县地震震级小,距震中 7 km 的易县台垂直摆倾斜仪有大幅的同震阶变,这是记录到的震源区应变调整;而赤城台和怀来台距震中超过 100 km、蓟县台超过 200 km,这两个台记录到的同震响应不属于震源区的应力调整,是地震动使周边应力场产生的调整,进而记录到的同震阶变。

有同震形变响应的 4 个台站中,易县、赤城、怀来、蓟县的震相分析、S 波与 P 波到时差及其同震形变响应特征见表 2。易县台使用的是 CTS-1 地震

计,频带 50 Hz—120 s;赤城台使用的是 BBVS-60 地震计,频带 50 Hz—60 s;怀来台使用的是 FBS-3 地震计,频带 20 Hz—20 s;上述地震计的采样率为 50~100 Hz。易县垂直摆倾斜仪等形变测项为分钟值采样,采样率为 1/60 Hz。形变数据比地震数据的采样率低几千倍,中小地震持续时间短,同震形变响应表现为台阶和突跳,未能反映出很好的形变波形,因此不能对同震形变响应做震相识别。

从地震波形分析,易县、赤城、怀来、蓟县的地震波持续时间为 1~3 分钟,而同震形变响应测项中有 13 项持续时间在 2~3 分钟(表 1),这与地震计记录到的地震波形持续时间一致;有 4 项持续时间为 6~10 分钟(表 1),其曲线形态为“同震阶跃—持续—部分恢复”,持续和恢复阶段主要是受地震波的作用,形变仪器的加载和卸载作用造成的。如不考虑持续和恢复阶段,同震阶跃的时间为 1~3 分钟,这与地震计记录到的地震波持续时间一致。

表 2 易县 $M_L3.8、3.3$ 地震震相分析、同震形变响应特征

地震/ M_L	台站	到时差/s	震相	同震形变响应特征
3.8	易县	2.38	Pg、Sg	同震阶跃—未恢复、同震阶跃—部分恢复
3.8	怀来	14.07	Pg、Sg	同震阶跃—未恢复、同震阶跃—部分恢复
3.8	赤城	21.05	Pn、Pg、Sg	同震阶跃—未恢复
3.8	蓟县	24.52	Pn、Pg、Sg	同震阶跃—持续—部分恢复
3.3	易县	2.42	Pg、Sg	无
3.3	怀来	14.55	Pg、Sg	同震阶跃—未恢复
3.3	赤城	21.16	Pn、Pg、Sg	同震阶跃—未恢复
3.3	蓟县	24.16	Pn、Pg、Sg	无

3 易县 $M_L3.8、3.3$ 地震重新定位结果

使用 hyp2000 程序,对易县 $M_L3.8、3.3$ 地震进行重新定位,参与定位的 21 个台站基本将震中包围,定位结果见表 3。结果显示易县 $M_L3.8$ 地震速

报目录与重新定位目录的偏差较大,经、纬度定位偏差分别为 $0.04^\circ、0.03^\circ$,速报目录震中与重新定位震中的偏差主要是由参与定位台站的数量、数据质量以及定位的算法、速度模型的选取等有关。

表 3 2010 年 7 月 30 日易县 $M_L3.8、3.3$ 地震重新定位与速报目录对比

地震	河北台网 EQT 速报目录		重新定位结果		偏差	
	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$
易县 $M_L3.8$	115.39	39.45	115.35	39.42	0.04	0.03
易县 $M_L3.3$	115.36	39.42	115.35	39.41	0.01	0.01

4 震源机制解及其同震形变响应台站震源球面投影分析

4.1 震源机制解

采用点源位错模型,层状介质速度结构,通过计算理论地震图,与观测的地震垂直向记录的直达 P、S 波最大振幅拟合,反演震源机制的方法^[10]。该方法适用于区域地震台网,而且台少震小的情况。只

要具有 4 个以上台站完整的垂直向记录波形,利用振幅比拟合就可以反演得到震源机制^[11]。由区域地震台网垂直向地震 A_p 和 A_s 振幅资料计算中小地震的震源机制,参考台站 Pg 初动选择最佳结果。

利用河北省数字地震台网记录的区域波形资料,选用震中周围 10 个台站。震中位置分别采用河北台网 eqt 目录和重新定位结果,用垂直向地震 A_p 和 A_s 振幅资料,计算 2010 年 7 月 30 日河北易县

M_L 3.8、3.3 地震的震源机制解参数,得出不同的解算结果(表 4、图 4)。

表 4 2010 年 7 月 30 日易县 M_L 3.8、3.3 地震震源机制解参数

日期	时间	震级 / M_L	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
			滑动角/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	方位/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$
2010-07-30 *	22:21:14	3.8	-131	72	33	-27	44	283	261	47	152	17	48	38
2010-07-30 *	22:42:44	3.3	-144	38	74	-57	68	314	265	54	20	17	121	30
2010-07-30 **	22:21:14	3.8	-64	61	294	-129	38	69	249	64	6	12	101	23
2010-07-30 **	22:42:44	3.3	-142	38	74	-58	67	312	263	56	19	16	118	29

注: * 采用河北台网 eqt 目录震中位置解算; ** 采用重新定位震中位置解算

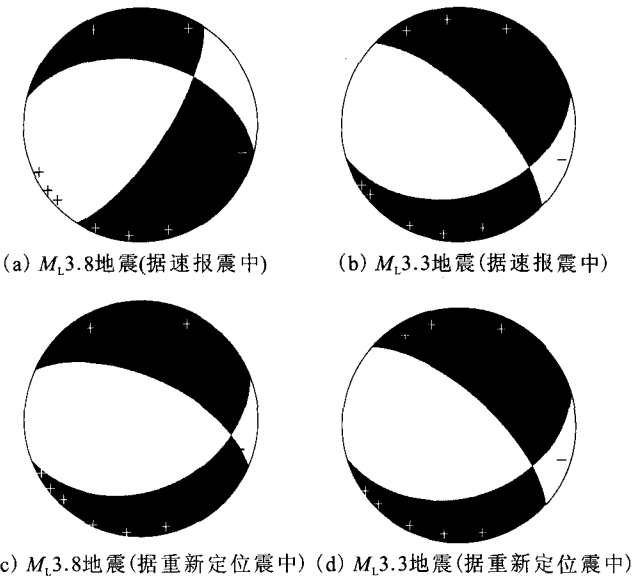


图 4 易县 M_L 3.8、3.3 地震震源机制解

Fig. 4 Focal mechanism solutions of Yixian M_L 3.8、 M_L 3.3 earthquakes.

重新定位结果两次地震位置更为靠近,计算所得的震源机制基本一致。易县 M_L 3.8 地震震源断层初步判定为 NEE 向,断层面参数为走向 69° 、倾角 38° 、滑动角 -129° ,断层表现为正断兼右旋走滑。易县 M_L 3.3 地震震源断层初步断定为 NEE 向,断层面参数为走向 74° 、倾角 38° 、滑动角 -142° ,断层表现为正断兼右旋走滑。两次地震震源机制类型基本一致。1970 年以来震中 100 km 范围内 M_L 5.0 以上地震只有 2006 年 7 月 4 日文安 M_L 5.5 地震(据全国地震小震目录)。文安地震震源机制为:P 轴方位 NEE、T 轴方位 NNW,接近水平。NNE 向的节面属于直立(倾角 87°);NNW 向的节面倾斜(倾角 43°)。震源断层面的滑动角 -133° ,为正断层兼走滑断层类型^[12]。易县地震与文安地震都为正断层兼走滑断层类型,震源机制解近似。张红艳等将张渤带分为六个研究区,其中易县地震震中位于张渤带中南段,易县地震的 P 轴方位为 SWW、T 轴方位为 NNE,与张渤带中南段的平均构造应力场趋

于一致^[13-14]。

4.2 同震形变响应台站震源球面投影分析

震中 350 km 内的主要形变台站共计 24 个(包括河北省 12 个、山西省 5 个、天津市 1 个、北京市 6 个),震中距为 0~100 km 的台站 3 个,101~200 km 的台站 8 个,201~300 km 的台站 9 个,301~350 km 的台站 4 个。计算出震中至形变台站的方位角、离源角,并根据重新定位结果计算出的震源机制解,对上述形变台站做震源球面投影(图 5)。投影结果表明有同震响应和无同震响应的形变台站主要集中在压缩区域,由于易县地震震级偏小,引起同震响应的台站相对较少,并且有同震响应的台站也主要集中在垂直摆倾斜仪测项,其中易县垂直摆倾斜仪的同震响应为 W 倾、S 倾(图 3),与断层错动造成的地倾斜方向基本一致(图 5)。

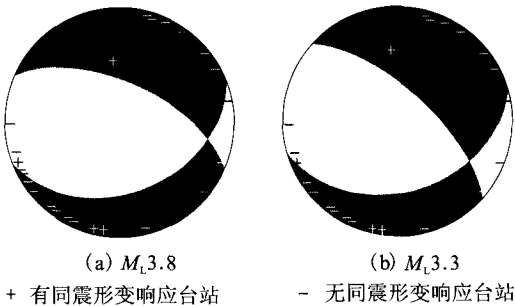


图 5 形变台站震源球面投影

Fig. 5 Seismic source projections of deformation stations.

5 结论

(1) 易县 M_L 3.8、3.3 地震属于中小地震,但仍有 4 个台站的 13 个测项记录到较为明显的同震形变响应,这在中小地震的同震形变响应分析中是较为突出的震例。由于近震及中小地震同震形变响应的主要表现形式为同震阶变和突跳,不同于远震大震表现的同震形变波,不能通过面波延迟、最大面波幅度等进行分析。

(2) 地震波形数据比定点形变数据的采样频率

高数千倍,地震计记录到的易县地震的地震波持续时间仅有 1~3 分钟,因此无法从同震形变响应数据中进行震相分析,但同震形变响应的持续时间与地震计记录到的地震波持续时间基本一致。

(3) 通过河北区域台网的 21 个台站的数字波形资料对易县地震重新定位,河北台网速报目录经纬度与重新定位经纬度最大偏差分别为 0.04° 、 0.03° 。

(4) 两次地震震源机制类型基本一致,发震断层表现为正断兼右旋走滑,与张渤带中南段平均区域构造应力场趋于一致。

(5) 有同震响应和无同震响应的形变台站主要集中在震源球面投影的压缩区域,易县垂直摆倾斜仪的同震响应为 W 倾、S 倾,与断层错动造成的地倾斜方向基本一致。

致谢:本文得到天津市地震局、山西省地震局、中国地震台网中心等单位提供的部分定点形变观测资料,在此表示衷心感谢!

[参考文献]

- [1] 牛安福,吉平,高福旺,等. 印尼强地震引起的同震形变波[J]. 地震, 2006, 26(1): 131-137.
- [2] 牛安福,张晶,吉平. 强地震引起的同震形变响应[J]. 内陆地震, 2005, 19(1): 1-7.
- [3] 周克昌,吴翼麟. 由同震倾斜阶跃应用反演方法研究震源机制[J]. 地壳形变与地震, 1990, 10(1): 13-20.
- [4] 刘序俨. 姑咱台地面周日倾斜响应特征分析[J]. 中国地震, 1993, 9(1): 68-73.
- [5] 刘序俨,洪星. 潮汐倾斜的几何物理含义及其剪应变属性[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4): 82-86.
- [6] 李兰生,刘建华. 同震阶变异常的特征与机制分析[J]. 地壳形变与地震, 1992, 12(3): 81-87.
- [7] 国家地震局科技监测司. 地震形变前兆特征的识别与研究[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [8] 沈旭章,常千军,梅秀苹. 兰州形变台水管倾斜仪映震能力的分析研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(4): 368-370.
- [9] 胡卫建,张俊山,周小川,等. 随州—信阳 $M_L 4.2$ 地震前定点形变异常特征[J]. 西北地震学报, 2001, 23(3): 274-278.
- [10] 梁尚鸿,李幼铭,束沛镒,等. 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, 1984, 27(3): 247-257.
- [11] 刁桂苓,高国英,聂小红,等. 伽师序列中小地震震源机制分析[J]. 国际地震动态, 2007(12): 1-9.
- [12] 刁桂苓,张四昌,孙佩卿,等. 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震[J]. 地震地质, 2006, 28(3): 497-502.
- [13] 张红艳,谢富仁,崔效锋,等. 张渤带陆地段现代构造应力场的非均匀特征[J]. 中国地震, 2009, 25(3): 314-324.
- [14] 方颖,张晶. 张家口—渤海断裂带分段活动性研究[J]. 地震, 2009, 29(3): 136-140.