

华北地区地壳形变连续观测灵敏台站研究*

马 栋¹, 马利军², 侯晓真¹, 屈 曼¹, 高 晨¹

(1. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 2. 张家口中心台, 河北 张家口 075000)

摘要: 依据《中国震例》和部分震例总结报告, 统计1966—2018年华北地区5.0级以上地震的形变异常; 结合形变台站及测项与地震的对应率、异常信度, 分析华北地区形变台站及测项的灵敏度; 再将研究区划分为4个区域, 分别统计测项灵敏度; 最后分析灵敏台站与所处构造位置关系。结果表明: 太原台、张家口台、易县台等7个台站相对灵敏, 且主要分布在张渤地震带西段和郅庐地震带北段; 水平摆在4个区域灵敏度较高, 水管仪在山西地震带灵敏度较高, 体应变在张渤地震带和郅庐地震带南段灵敏度较高, 伸缩仪在郅庐地震带北段灵敏度较高; 正断性质断层上盘和逆断性质断层下盘附近的台站灵敏度相对较高。

关键词: 形变观测; 灵敏台点; 映震效能; 华北地区

中图分类号: P315.78

文献标识码:

文章编号: 1000-0666(2019)03-0405-06

0 引言

我国对地壳形变的研究始于1962年新丰江水库6.1级地震(刘鼎文, 1992), 经过多年的发展, 已形成第三代地壳形变连续观测(蔡惟鑫等, 1997)。地壳形变连续观测(以下简称形变观测)主要包括地倾斜观测和地应变观测, 观测仪器包括水管倾斜仪、垂直摆倾斜仪、水平摆倾斜仪、伸缩仪、钻孔体应变、分量应变等。开展形变观测的主要目的是获取与地震孕育和发生有关的震前异常信息, 现有形变观测台站记录的前兆异常信息差别明显, 部分台站在震前的前兆反映较为灵敏, 而有一些台站在震前记录的异常较少, 甚至捕捉不到异常信息, 这说明不同形变台站在前兆反映的灵敏程度方面存在着差异。

在前兆观测灵敏台站方面, 有较多的研究人员开展了相关工作: 焦明若和张国民(1998)依据地震前兆复杂性成因机理, 认为前兆观测台站的构造位置对前兆反映有一定影响, 处于构造灵敏点上的台站, 前兆显示能力可能会强些; 车用太(1990)认为位于活动断裂带的前兆观测点较位于非断裂带的映震能力强, 尤其是断裂的端点、拐点与交汇点附近的观测点映震能力更强。相关

岩石试验也表明, 断层附近存在灵敏位置, 马瑾等(2007)通过岩石破裂实验研究了雁列断层失稳错动的热场前兆模式的机制, 并分析了显著异常出现的条件及有利观测部位。

以往关于前兆观测灵敏台站的研究主要集中在流体方面, 如车用太(1990)研究了区域井网观测井的水文地质条件、井孔结构、观测项目与方式等对地震前兆反映能力的影响, 并结合水动力学模型试验, 提出了评定观测井映震灵敏性条件的半定量化方法; 张淑亮等(2011)对运城东郭流体观测井的震兆特征及映震灵敏性开展了分析; 李良和范垂宏(1997)、高小其等(2000)开展了流体观测井的灵敏性研究。形变方面, 刘琦等(2016)通过统计震例参考资料中出现过形变异常的台站, 分析了南北地震带上形变灵敏台站。但总的来说, 在形变观测方面开展灵敏台点的研究还相对较少。本文基于1966—2018年华北地区的定点形变前兆异常震例, 根据地震对应率、异常信度等因素, 计算该区台站及测项灵敏度, 研究形变灵敏台站与所处构造位置的关联性。

1 资料选取

1966—2018年华北地区5.0级以上地震共34

* 收稿日期: 2019-02-21.

基金项目: 中国地震局震情跟踪面上课题(2018020202)和河北省地震局地震科技星火计划项目(DZ20180316005)联合资助。

次（不包括强余震），震中分布及震源机制解见图1。由于震中位于海域的地震有4次，无形变异常，不做研究，因此本文选取5.0级以上震例共30次。其中1966—2010年华北地区（33°~43°N，108°~125°E）5.0级以上地震的形变前兆异常，根据已出版的《中国震例》（张肇诚，1988，1990a，b，1999，2000；陈琪福，2002a，b，c，2008；蒋海昆，2014a，b）进行统计；2011—2018年华北地区共发生2次5.0级以上地震，分别为2013年1月23日辽宁灯塔5.1级、2013年4月22日内蒙古科左旗5.3级地震，这2次地震的形变前兆异常根据震例总结统计。

按照形变前兆异常统计字段（表1），对华北地区定点形变异常进行了整理，共统计出143项形变异常，由于地应力观测已经停测，所以删除地应力异常，删除已经停测台站（蔚县、大灰厂、辉县、东三旗、涑水、香山等）的异常，最后共整理出27个异常台站（图1）的70项异常，这些异常共对应20次震例。

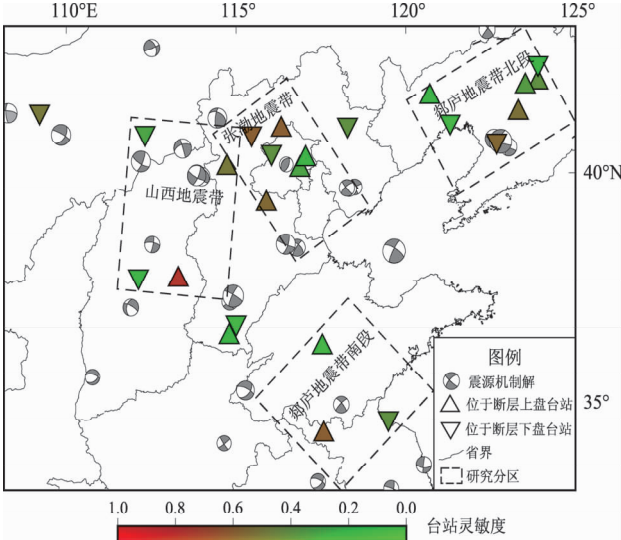


图1 1966—2018年华北地区5级以上地震震源机制解及形变台站灵敏度分布图
Fig.1 Distribution of focal mechanism solutions of $M \geq 5.0$ earthquakes from 1966 to 2018 and sensitivity of deformation stations in North China

表1 形变前兆异常统计字段
Tab.1 Statistical fields of deformation precursory anomaly

序号	统计字段	序号	统计字段	序号	统计字段	序号	统计字段
1	编号	10	节面Ⅰ倾角/(°)	19	震例编号	28	异常幅度单位
2	经度/(°)	11	节面Ⅰ滑动角/(°)	20	台站名	29	异常特征及备注
3	纬度/(°)	12	节面Ⅱ走向/(°)	21	测项名	30	测点经度/(°)
4	M_s	13	节面Ⅱ倾角/(°)	22	方向	31	测点纬度/(°)
5	震源深度/km	14	节面Ⅱ滑动角/(°)	23	异常处理方法	32	异常类型
6	地点	15	序列类型	24	异常类型	33	异常信度
7	发震断层	16	最大余震时间	25	异常开始时间	34	异常类别
8	震源机制类型	17	最大余震震级	26	异常结束时间		
9	节面Ⅰ走向	18	序列地震个数	27	异常幅度		

2 灵敏度计算与分析

2.1 形变台站灵敏度

形变台站灵敏度是指台站对周边地区地震形变前兆异常反映的灵敏程度，台站灵敏度 S_s 计算公式为：

$$S_s = (C_s/T_s) * R_s \tag{1}$$

式中： T_s 为台站映震范围内的地震数量，即自台站观测以来200，300，500 km范围内5~5.9级、

6~6.9级、7级以上地震数量总和（去除余震、海域地震），距离、震级的统计范围参照了《中国震例》（张肇诚，2000）中定点观测台网前兆观测资料的统计范围； C_s 为台站对应地震次数，即根据异常统计表统计出台站映震范围内震前有异常的地震次数； R_s 为台站异常信度，即按照Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ类信度分别取1.0，0.8，0.6，把该台站所有的异常信度取平均值。

华北地区形变台站灵敏度的计算结果见表2。取灵敏度 $S_s > 0.5$ 的台站作为灵敏台站，灵敏台站1主要分布于张渤地震带西段和辽吉地震带北段（表2）。

表 2 华北地区形变台站灵敏度

Tab. 2 The sensitivity of deformation stations in North China

台站名	R_S	C_S	T_S	S_S
宝昌	0.80	1	3	0.27
昌平	0.80	2	5	0.32
朝阳	0.80	1	3	0.27
承德	0.80	1	2	0.40
赤城	0.90	2	3	0.60
峰峰矿	0.80	1	3	0.27
抚顺	0.80	1	2	0.40
呼和浩特	0.80	2	5	0.32
怀来	0.80	2	4	0.40
锦州	1.00	1	5	0.20
离石	1.00	1	4	0.25
连云港	0.80	1	2	0.40
辽阳	0.80	2	3	0.53
沈阳	0.90	2	5	0.36
顺义	0.80	1	3	0.27
太原	0.91	5	6	0.76
泰安	0.80	1	4	0.20
铁岭	0.80	1	3	0.27
乌加河	1.00	1	2	0.50
徐州	0.80	3	4	0.60
阳原	1.00	2	4	0.50
易县	0.93	3	5	0.56
营口	0.95	3	5	0.57
永年	0.60	1	3	0.20
张家口	0.80	3	4	0.60

自 1966 年以来，这 2 个构造区域 5 级以上地震相对比较活跃，台站灵敏度计算结果与区域地震较多有一定的关系，但计算时主要考虑台站的映震情况，即台站映震范围内震前有异常的地震次数，如果台站周边地震较多，但震前异常较少，所计算出的台站灵敏度也会偏低。

2.2 测项灵敏度

测项灵敏度是指台站的某一测项对周边地区显著地震震前异常反映的灵敏程度，测项灵敏度 S_L 计算公式为：

$$S_L = (C_L/T_L) * R_L$$

(2)

式中： T_L 为测项映震范围内的地震数量，即自测项观测以来 200，300，500 km 范围内 5 ~ 5.9 级、6 ~ 6.9 级、7 级以上地震数量总和（去除余震、海域地震），距离、震级的统计范围参照了《中国

震例》（张肇诚，2000）中定点观测台网前兆观测资料的统计范围； C_L 为测项对应地震次数，即根据异常统计表，统计出测项映震范围内震前有异常的地震次数； R_L 为测项异常信度，即按照 I，II，III 类信度分别取 1.0，0.8，0.6，把该台站测项的异常信度取平均值。

测项灵敏度计算结果如表 3 所示，灵敏度较高的测项均为地倾斜测项，除了太原台水管仪，其余都是水平摆测项。把所有大于 0 的测项灵敏度

表 3 测项灵敏度统计

Tab. 3 Statistic of the sensitivity of observation items

台站	测项	R_L	C_L	T_L	S_L
宝昌	水平摆	0.80	1	3	0.27
昌平	体应变	0.80	2	5	0.32
朝阳	水平摆	0.80	1	3	0.27
承德	水平摆	0.80	1	2	0.40
赤城	水平摆	0.90	2	3	0.60
峰峰矿	体应变	0.80	1	3	0.27
抚顺	伸缩仪	0.80	1	2	0.40
呼和浩特	水平摆	0.80	2	5	0.32
怀来	体应变	0.80	2	4	0.40
锦州	水平摆	1.00	1	5	0.20
离石	水平摆	1.00	1	4	0.25
连云港	水平摆	0.80	1	2	0.40
辽阳	水平摆	0.80	1	3	0.27
辽阳	伸缩仪	0.80	1	3	0.27
沈阳	水平摆	0.90	2	5	0.36
顺义	体应变	0.80	1	3	0.27
太原	水平摆	0.80	4	6	0.53
太原	水管仪	0.92	4	6	0.61
泰安	水平摆	0.80	1	4	0.20
铁岭	伸缩仪	0.80	1	3	0.27
乌加河	水平摆	1.00	1	2	0.50
徐州	水管仪	0.80	1	4	0.20
徐州	体应变	0.80	2	4	0.40
阳原	水平摆	1.00	2	4	0.50
易县	水平摆	1.00	2	5	0.40
易县	水管仪	1.00	1	5	0.20
易县	伸缩仪	0.60	1	5	0.12
营口	水平摆	0.95	3	5	0.57
永年	水管仪	0.60	1	3	0.20
张家口	水平摆	0.80	1	4	0.20
张家口	水管仪	0.80	1	4	0.20
张家口	体应变	0.80	2	4	0.40
张家口	伸缩仪	0.80	1	4	0.20

按照仪器类别取平均,得出伸缩仪、水管仪、水平摆、体应变的平均灵敏度分别为 0.25, 0.28, 0.37, 0.34;从仪器的平均灵敏度分析,水平摆的灵敏度最高,其次是体应变,伸缩仪的灵敏度相对较低;根据《中国震例》统计出的华北地区形变异常,垂直摆无震例,因此垂直摆的灵敏度最低。

2.3 构造区域分析

根据台站位置及华北地区构造,将研究区分为张渤地震带、山西地震带、郯庐地震带北段、郯庐地震带南段 4 个区域(图 1),分别计算各个区域内的各类仪器的灵敏度(表 4)。张渤地震带台站包括:宝昌台、昌平台、顺义台、赤城台、怀来台、张家口台、易县台;山西地震带台站包括:离石台、太原台、阳原台、呼和浩特台;郯庐地震带北段台站包括:辽阳台、沈阳台、铁岭台、营口台、抚顺台、锦州台、朝阳台;郯庐地震带南段台站包括:泰安台、连云港台、徐州台。

从表 4 可以看出,水平摆灵敏度在各个区域都较高,特别是在张渤地震带和郯庐地震带北段。这是因为水平摆具有测量精度高、稳定性好、抗干扰能力强等特点(王秀等,2016;李希亮等,2018),且对远场地震具有较强的响应能力(郭国祥等,2013)。根据相关研究结果,在强震发生前的短临阶段水平摆观测也往往有明显的地壳形变反映(胡琦薇,1984),因此水平摆在各个区域灵敏度都较高。水管仪在山西带灵敏度较高,在其他区域一般。这可能与山西地震带的区域构造有关,山西地震带的构造区内以 NE 向断裂且具有倾滑或走滑的运动方式为主(杨国华等,1999)。体应变在张渤地震带和郯庐地震带南段灵敏度较高,在其他区域为 0;伸缩仪在郯庐地震带北段灵敏度较高,在其他区域较差,这反映出在这 2 个区域应变类观测灵敏度优于倾斜类观测灵敏度。

表 4 分区域测项灵敏度统计

Tab. 4 Statistic of sensitivity of observation items in subarea

测项	张渤地震带	山西地震带	郯庐地震带 北段	郯庐地震带 南段
水平摆	0.37	0.4	0.33	0.3
水管仪	0.2	0.61	0	0.2
体应变	0.35	0	0	0.4
伸缩仪	0.16	0	0.31	0

3 灵敏台点与所处构造位置的关联性

根据中国活动断层(邓启东,2007)、《河北地震构造特征》(彭远黔,孟立朋,2017)等资料,收集整理华北地区 25 个主要形变台站所处附近断层的构造特征,包括走向、倾向、倾角、断层性质、活动年代等。计算台站距断层的距离,根据断层走向、倾向以及台站与断层的相对位置,统计台站处于断层的上盘或下盘。为了便于分析,断层类型统计时,对于走滑兼正断性质的断层按照正断类型统计,走滑兼逆断性质的断层按照逆断类型统计。

以灵敏度 $S_s > 0.5$ 的台站作为灵敏台站,由图 1 和表 2 可知,位于断层上盘的灵敏台站有 5 个(赤城台、辽阳台、太原台、徐州台、易县台),这 5 个台站附近的断层都是以正断和正走滑为主;位于断层下盘的灵敏台站有 2 个(营口台、张家口台),这 2 个台站附近的断层都是逆断和逆走滑为主(表 5)。分析认为,对于处于正断性质断层附近的台站,如果建在断层上盘,台站灵敏度相对较高;对于处于逆断性质断层附近的台站,如果建在断层下盘,台站的灵敏度相对较高。从华北地区形变台站灵敏度与台站距断层的距离分析,未发现台站灵敏度与距断层的距离具有较好的相关关系(图 2)。

表 5 台站附近断层类型与台站关系

Tab. 5 The relationship of the fault type and deformation station

台站位置	正断	逆断	不确定	合计
位于断层上盘 ($S_s > 0.5$)	5	0	0	5
位于断层下盘 ($S_s > 0.5$)	0	2	0	2
位于断层上盘 ($S_s < 0.5$)	4	4	1	9
位于断层下盘 ($S_s < 0.5$)	5	2	1	8

从地震前兆成因机理方面分析,前兆观测存在构造灵敏点(焦明若,张国民,1998);根据相互作用断层失稳的模拟计算结果(李炳乾,1990),断层失稳前,在不同区域有不同的前兆变化,而同一区域对不同断层失稳的前兆响应也不相同,有些区域为“前兆灵敏点”;相关岩石试验表明,雁列断层存在失稳前兆的最佳观测部位(马瑾等,2007)。模拟计算、岩石试验以及实际

震例统计资料都表明,形变观测存在灵敏观测位置,因此在形变台站的选址方面应充分考虑选取灵敏观测位置,以获取更为有效的前兆信息,为震情研判提供更为可靠的依据。

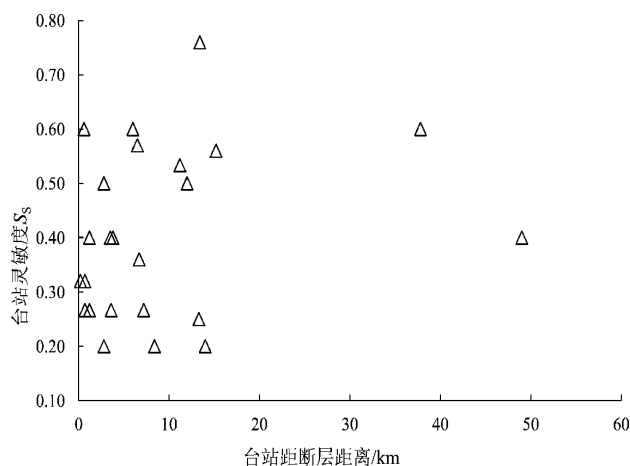


图2 台站灵敏度与台站距断层距离关系

Fig. 2 The relationship of the station sensitivity and distance from deformation station to fault

4 结论及讨论

4.1 结论

本文通过计算分析华北地区形变台站及测项灵敏度,并结合台站与断层的位置关系,得出以下结论:

(1) 台站灵敏度计算综合考虑了台站映震范围内的地震数量、台站对应地震次数以及台站的异常信度。统计分析表明,华北地区形变灵敏台站主要分布在张渤地震带西段和郯庐地震带北段。

(2) 测项与台站灵敏度计算方法相同。从测项灵敏度计算结果来看,灵敏度较高(>0.5)的测项均为地倾斜测项,并且除了太原台水管仪,其余都是水平摆测项。从仪器的平均灵敏度来分析,水平摆的灵敏度最高,其次是体应变,伸缩仪的灵敏度相对较低。

(3) 华北地区各构造区域的测项灵敏度有明显的差异,因此在仪器布设方面有必要优先布设在该区域灵敏度较高的仪器测项。

(4) 通过统计分析华北地区形变台站灵敏度以及台站与断层相对位置关系,对于处于正断性质断层附近的台站,位于断层上盘的台站灵敏度

相对较高;对于处于逆断性质断层附近的台站,位于断层下盘的台站灵敏度相对较高。本文得出的台站灵敏度与断层位置关系为统计结果,具体的研究还需进一步深入开展数值模拟、岩石实验等工作。

4.2 讨论

华北地区地应力观测震例比较丰富,但根据相关文献,电感式地应力的传感器存在较为明显的弱点,并且在观测中遇到了标定、接触、干扰、密封等问题(邱泽华,2017),现在已无地应力观测(电感法地应力),因此再进行地应力观测的统计意义不大;部分台站(大兴、东三旗、涞水、香山等)停测,这些台站虽有一些震例,但由于后续无资料,所以无法进行映震效能统计分析。除去停测的台站、测项,华北地区形变异常只有70项,异常数量偏少,这与1998年张北6.2级地震后华北长期6级地震平静、2006年文安5.1级地震后华北长期5级地震平静有一定的关系。

相关岩石试验表明,断层错动失稳前在雁列岩桥区往往观测到裂纹扩展引起的声发射和应变变化以及在断层段观测到预滑;岩桥区及与之邻近的断层段是断层失稳前兆的最佳观测部位(马瑾等,2007);因此后续工作可以考虑对雁列断层附近的形变灵敏台站位置开展深入研究。形变台站的规划、选址应充分考虑区域构造、断层活动因素,并结合数值模拟、岩石试验等,选取灵敏位置开展形变观测,以获得更为有效的前兆信息。

参考文献:

- 蔡惟鑫,谭适龄,蒋骏,等. 1997. 中国第三代地壳形变连续观测技术——地壳形变连续观测台网数字化网络系统[J]. 地壳形变与地震,17(1):106-111.
- 车用太. 1990. 地下水动态观测井映震灵敏条件研究[J]. 中国地震,6(4):69-75.
- 陈琪福. 2002a. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京:地震出版社.
- 陈琪福. 2002b. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京:地震出版社.
- 陈琪福. 2002c. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京:地震出版社.
- 陈琪福. 2008. 中国震例(2000—2002)[M]. 北京:地震出版社.
- 邓启东. 2007. 中国活动构造图(1:4000000)[M]. 北京:地震出版社.
- 高小其,许秋龙,张学敏,等. 2000. 乌鲁木齐10号泉流体综合观测及映震灵敏性初析[J]. 内陆地震,14(3):243-251.
- 郭国祥,张红秀,郭林旺. 2013. 山西临汾中心地震台水平摆与垂直摆倾斜仪效能对比研究[J]. 山西地震,(2):11-14.
- 胡琦薇. 1984. 水平摆倾斜仪观测作用的讨论[J]. 华北地震科学,2

- (3):72-75.
- 蒋海昆. 2014a. 中国震例(2003—2006)[M]. 北京:地震出版社.
- 蒋海昆. 2014b. 中国震例(2007—2010)[M]. 北京:地震出版社.
- 焦明若, 张国民. 1998. 地震前兆复杂性成因机理研究的讨论(二)——地震前兆复杂性成因机理[J]. 地震, 18(2):112-118.
- 李炳乾. 1990. 相互作用断层失稳的前兆变化的分析[J]. 东北地震研究, 6(2):25-34.
- 李良, 范垂宏. 1997. 丰满井水氡的映震灵敏性初探[J]. 地震地质, 19(1):72-77.
- 李希亮, 李惠玲, 孟建国, 等. 2018. 泰安地震台垂直摆和水平摆抗干扰能力对比[J]. 地震地磁观测与研究, 39(2):116-120.
- 刘鼎文. 1992. 中国地壳形变研究三十年[J]. 地壳形变与地震, 12(4):90-94.
- 刘琦, 闫伟, 李智蓉, 等. 2016. 南北地震带定点形变前兆异常指标初建[J]. 地震, 36(4):76-88.
- 马瑾, 刘力强, 刘培洵, 等. 2007. 断层失稳错动热场前兆模式: 雁列断层的实验研究[J]. 地球物理学报, 50(4):1141-1149.
- 彭远黔, 孟立朋. 2017. 河北地震构造特征[M]. 石家庄:河北人民出版社.
- 邱泽华. 2017. 钻孔应变观测理论与应用[M]. 北京:地震出版社, 5-8.
- 王秀, 卢海燕, 蔡莉, 等. 2016. 石英水平摆倾斜仪观测性能提高方法[J]. 地震地磁观测与研究, 37(6):121-125.
- 杨国华, 王敏, 韩月萍, 等. 1999. 山西地震带近期水平运动状态及活动性[J]. 地壳形变与地震, 19(4):50-55.
- 张淑亮, 李斌, 李天骄, 等. 2011. 运城东郭流体观测井震兆特征及映震灵敏性分析[J]. 地震地磁观测与研究, 32(2):53-59.
- 张肇诚. 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇诚. 1990a. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇诚. 1990b. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇诚. 1999. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京:地震出版社.
- 张肇诚. 2000. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京:地震出版社.

Study on Sensitive Stations for Continuous Crustal Deformation Observation in North China

MA Dong¹, MA Lijun², HOU Xiaozhen¹, QU Man¹, GAO Chen¹

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

(2. Central Seismological Station of Zhangjiakou, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract

According to *Earthquake Cases in China* and summary report on some earthquakes, we count the deformation anomaly of $M_s \geq 5.0$ earthquakes from 1966 to 2018 in North China. Based on the seismic correspondence and anomaly reliability of deformation stations and items, we analyze the sensitivity of deformation stations and items in North China. Then we obtained the sensitivity of items in four sub-sreas which were divided from the study area. Finally, the relationship between sensitive stations and their tectonic locations was analyzed. The results show that the sensitivity of some deformation stations is relatively high, includes Taiyuan, Zhangjiakou, and Yixian stations etc., which mainly distributed in the west segment of Zhangjiakou-Bohai seismic active belt and the north segment of Tancheng-Lujiang seismic zone. The sensitivity of horizontal pendulum are higher in each sub-area, the sensitivity of water tube tiltmeter is higher in Shanxi seismic zone, the sensitivity of body strain is higher in Zhangjiakou-Bohai seismic active belt and south segment of Tancheng-Lujiang seismic zone, the sensitivity of extensometer is higher in north segment of Tancheng-Lujiang seismic zone. The sensitivity of the stations near the hanging wall of normal fault and the footwall of reverse fault is relatively high.

Keywords: deformation observation; sensitive station; reflecting earthquake ability; North China