

刘琦,李腊月,胡乐银. 2023. 北京及周边地区跨断层形变站网评估[J]. 地震研究, 46(4): 491–502, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0055.

Liu Q, Li L Y, Hu L Y. 2023. Evaluation of the cross-fault observation network in Beijing and its adjacent areas[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4): 491–502, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0055.

北京及周边地区跨断层形变站网评估*

刘琦¹, 李腊月², 胡乐银³

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180;

3. 北京市地震局, 北京 100080)

摘要: 为掌握北京及周边地区跨断层形变观测场地目前的效能情况, 从而实现准确研判该区域地震危险性, 降低未来地震可能造成的灾害风险, 综合考虑跨断层场地监测条件和地震预测效能两方面设计了观测站网评估方案, 分别从场地监测环境、监测有效性、地下水位变化及地表沉降影响、场地预测配套性、最优预测指标效能和区域变形配套性等方面开展研究, 给出了北京及周边地区跨断层形变站网的综合评估结果及后续站网优化建议。结果表明: ①目前北京及周边地区的跨断层场地对区域内大多数主要断层具有较好的监测能力和地震预测效能, 但八宝山—黄庄—高丽营断裂上多数观测场地监测条件相对较差, 预测效能普遍偏低, 建议选择该断裂的其它位置补充新建若干观测场地。②除了断裂构造, 区域地质构造、水文地质条件等也对观测场地效能有重要影响, 后续新场地选址时需要重点考虑这些因素。

关键词: 跨断层观测; 地震预测效能; 监测条件; 地下水位; 构造环境; 北京

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2023)04-0491-12

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0055

0 引言

北京是中国的政治、文化、国际交往和科技创新中心, 经济发达、人口稠密, 同时北京及周边地区也是强震活动较为频繁的区域之一, 历史上曾发生过1679年三河—平谷8级地震及多次6级以上地震(蒋铭, 马宗晋, 1985; 张国民等, 1988), 特别是新中国成立以来该区域发生了1978年唐山7.8级和滦县7.1级地震, 造成了24万多人死亡和巨大经济损失。因此, 针对北京及周边地区具备强震孕震能力的主要断层, 开展有效断层运动监测, 捕捉地震孕育过程中可能的异常现象, 对准确研判区域的地震危险性具有重要意

义, 针对现有的断层形变观测开展监测、预测效能评估是尤为重要的环节。

早在20世纪60年代前后, 北京及周边地区已开始陆续布设跨断层的形变观测场地, 经过数十年不断的发展, 目前已经有20多个场地, 积累了数十年的观测数据, 针对这些场地的监测环境以及实际的地震预测效能, 前人已开展了大量的研究(陆明勇等, 2011, 2013, 2018), 中国地震局也曾组织相关单位进行评估分析和站网改造方案设计^{①②}。由于观测环境处于动态变化之中, 特别是随着城市化发展的稳步推进, 以往研究中没有充分考虑的一些影响因素也变得突出, 例如华北地区相对匮乏的水量补给和不断提升的用水需求之间的矛盾剧增, 造成了超量开采地下水的问题。

* 收稿日期: 2022-11-02.

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC1500502); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2021IEF1206).

第一作者简介: 刘琦(1985-), 副研究员, 主要从事地壳形变与地球动力学等方面研究. E-mail: liuqi@ief.ac.cn.

① 华北强震跟踪工作组, 形变分析预报技术管理组. 2015. 首都圈跨断层流动基线、水准场地野外调研与优化改造建议报告.

② 中国地震局第一监测中心. 2017. 华北地区跨断层场地监测效能评估与新建场地论证.

受此影响,华北平原成为中国沉降速率和影响面积最大的地区,局部地区的累积沉降量甚至超过了 3.4 m,北京地区的最大累积沉积量超过 1.4 m (何庆成等, 2006; 杨艳, 2015; 郭海朋等, 2017), 因此在分析北京及周边地区跨断层观测条件时, 需要考虑这种地下水位变化及其引发的区域性沉降所带来的影响。地下水储量、水位变化等的动态监测^①以及区域水准、GNSS、InSAR 等观测资料的积累为深入开展相关影响的分析提供了重要基础 (梁芳等, 2013; 孙启凯等, 2017; Zhang *et al.*, 2019; 史珉等, 2021; Bai *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022)。

以往的地震异常判识和预测效能评估大多基于定性认识, 专家经验对结果有重要影响。近几年在中国地震局监测预报司和地壳形变分析预报技术管理组的统一组织下, 相关信息提取、异常确定、效能评估等的定量方法得到了长远发展 (中国地震局监测预报司, 2020), 并且已经开始在业务中进行推广应用^②, 为开展跨断层场地的预测效能评估提供了重要可靠的方法基础。

因此, 本文在充分考虑前人已有研究基础上, 针对北京及周边地区跨断层形变观测站网设计了评估方案, 从跨断层场地的监测条件以及地震预测效能两方面开展综合评估, 给出综合评估结果, 针对关键性的影响因素进行了分析讨论, 提出了未来北京及周边地区跨断层形变站网的优化建议。

1 监测条件评估

北京及周边地区的跨断层形变测量始于 20 世纪 60 年代末, 目前, 共有跨断层观测场地 27 处, 其中流动场地 25 处、定点台站 2 个, 观测场地遍及 NW 走向的南口—孙河断裂、施庄断裂、涑水—高碑店断裂以及 NE 走向延矾盆地北缘断裂、南口山前断裂、紫荆关断裂、黄庄—高丽营断裂、夏垫断裂、唐山断裂等多条主要活动断裂 (图 1)。为给出当前北京及周边地区跨断层场地监测条件较为客观的评估结果, 本文将从场地的监测环境、监测有效性、地下水位变化及地表沉降影响等几个方面开展评估分析。

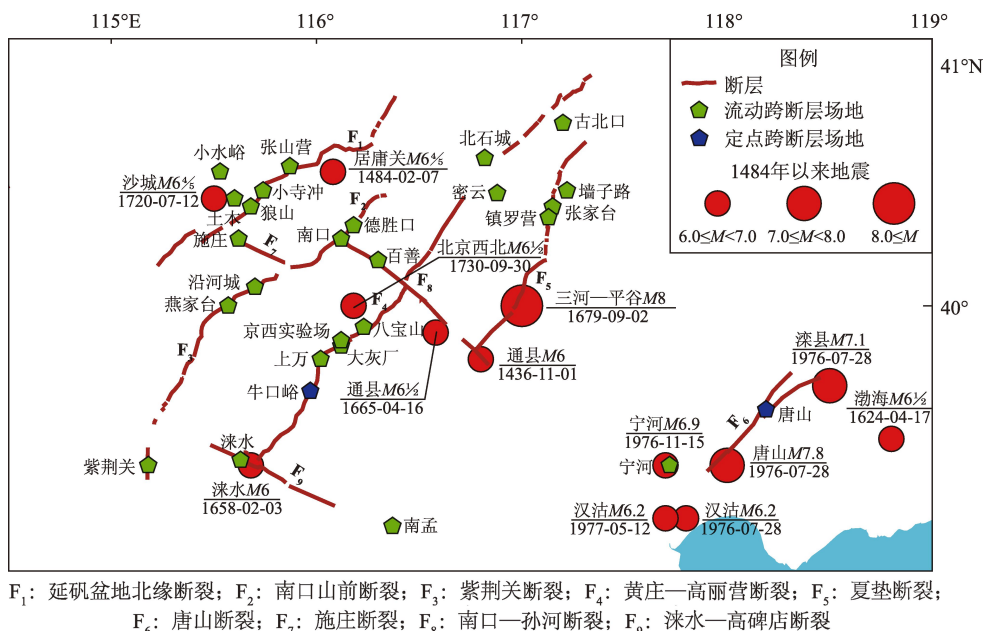


图 1 北京及周边地区构造背景、 $M \geq 6.0$ 历史地震及跨断层场地分布
 Fig. 1 Regional tectonic background, $M \geq 6.0$ historical earthquakes and distribution of the cross-fault sites in Beijing and its adjacent areas

① 北京市水资源公报. <http://swj.beijing.gov.cn/zwgk/sjfb>.

② 中国地震局地震预测研究所. 2020. 关于印发《震情会商技术方法业务应用推荐清单 (2020 年)》的函 (震预函 [2020] 148 号)。

1.1 监测环境评估

参考中国地震局相关单位前期工作基础以及前人的研究成果，针对北京及周边地区的跨断层形变场地的监测环境开展定性评估，主要考虑测桩类型、是否跨过目标断层、周围是否存在显著干扰等因素。场地监测环境评估的具体准则为：当同时满足测桩类型为基岩、观测跨过目标断层、周边无显著干扰3个条件时，定为A类；当上述

条件同时满足2个时，定为B类；当上述条件只满足一个或都不满足时，定为C类，评估结果见表1。由于不同研究所考虑的因素存在一定差异，并且近几年部分场地经过了升级改造，周边环境也有一定变化，因此本文与前人的结果存在部分差异，但总体较为一致。北京及周边地区跨断层场地的监测环境整体较好，其中A类场地14处，B类场地8处，合计占总场地数的81.5%。

表1 北京及周边地区跨断层场地监测环境定性评估

Tab. 1 Qualitative assessment of the monitoring environment of the cross-fault observation sites in Beijing and its adjacent areas					
序号	监测场地	测桩类型	是否跨过断层	是否存在显著干扰	监测环境类型
1	北石城	基岩	是	否	A
2	密云	基岩	是	是（附近有两口机井）	B
3	古北口	基岩	是	否	A
4	墙子路	基岩	是	否	A
5	张家台	基岩	是	否	A
6	镇罗营	基岩	是	是（W1点埋设在破碎、疏松的片麻岩中）	B
7	张山营	基岩	是	否	A
8	德胜口	基岩	是	否	A
9	南口	基岩	是	是（BM4测点被破坏，邻近蓄水池）	B
10	百善	土层	是	是（位于公路旁，且受地下水抽水影响严重）	C
11	燕家台	基岩	是	是（N、W端点位于破碎带上）	B
12	沿河城	基岩	是	否	A
13	八宝山	基岩	是	是（园林建设等环境影响较大，W端点无法观测）	B
14	大灰厂	基岩	是	是（场地周边陆续建有工棚和度假村）	B
15	上万	土层	是	是（至少有3个测墩埋设于人工采石挖土陡坎的边缘）	C
16	京西实验场	基岩	是	否	A
17	小水峪	基岩	是	否	A
18	土木	基岩	是	是（位于庄稼地附近，易受人干扰和破坏）	B
19	狼山	土层	不明确	是（测量线路沿主干公路，受环境影响严重）	C
20	施庄	基岩	是	否	A
21	紫荆关	基岩	是	否	A
22	涑水	基岩	是	否	A
23	南孟	土层	不明确	是（周边修路、建设导致多个点破坏）	C
24	宁河	土层	不明确	是（土层多为淤泥质，稳定性差）	C
25	小寺冲	基岩	是	是（村民私自采石影响）	B
26	唐山	基岩	是	否	A
27	牛口峪	基岩	是	否	A

1.2 监测有效性评估

跨断层形变观测的目的是监测断层运动的动态演化，从而为地震预测提供可靠参考。因此，

能否有效反映真实的断层运动，是评估跨断层场地监测条件的一项重要指标。针对跨断层场地监测有效性的评估，一方面可以直接基于原始观测

曲线定性判断断层活动特征,另一方面可以基于几何关系公式定量计算断层活动参数,从而分析断层活动特征(薄万举等,1998;李腊月等,2016)。为此,笔者设定了跨断层场地监测有效性的评估准则:从长趋势背景运动角度,若原始观测曲线及计算的活动参数结果反映的断层活动方式与地质学给出的断层背景活动一致,则定为A类;若原始观测曲线及计算的活动参数结果反映的断层活动方式有小幅波动,但整体上与地质学给出的断层背景活动一致,则定为B类;若原始观测曲线及计算的活动参数结果反映的断层活动方式不明确,或与地质学、其它手段给出的断层背景活动不一致,则定为C类。

具体在计算断层活动参数时,根据测项的不同选用不同的数学模型。对于布设有2条基线和水准的综合观测场地,断层活动的3个分量计算公式为:

$$\begin{cases} d = \frac{\Delta S_1 \sin \alpha_2 - \Delta S_2 \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_2} \\ b = \frac{\Delta S_1 - d \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} \\ c = \frac{1}{2}(\Delta h_1 + \Delta h_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: d 为断层两盘水平扭错量; b 为水平张压活动量; c 为垂直升降量; ΔS 为基线观测变化量(以伸长为正); α 是由断层走向逆时针转动至基线方向的角度; Δh 为水准观测变化量(以上盘相对下盘下降为正)。定义 k 为断层3个参数曲线的斜率,当 $k > 0$ 时表示右旋、张性、正断层活动,若符号相反则表示断层活动性质相反。

对于仅布设1条基线和水准的场地,垂直升降量直接采用水准资料进行计算,水平扭错量计算公式为:

$$d = \frac{\Delta S}{\cos \alpha} - \Delta h \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \quad (2)$$

式中: β 为断层倾角。

针对水准数据,选用起始年的观测数据作为参考基准,利用每年某个月份的测值减去基准年对应月份的测值,计算每年在基准年基础上的累积水准观测变化量 Δh , $\Delta h > 0$ 表示正断层活动,

上盘下降; $\Delta h < 0$ 表示逆断层活动,上盘上升。经过该处理,基本可以消除季节变化等因素引起的年变影响,得到的断层垂直升降累积量能相对客观地描述断层在观测期内的活动状态。

针对各跨断层形变场地开展相关断层活动参数计算,结合已有地质研究结果(高文学,马瑾,1993;郝书俭,尤惠川,2001;徐锡伟等,2002;尤惠川等,2002;张世民等,2007;查明等,2011;杨海盟等,2014),依据上述准则进行跨断层场地监测有效性的评估,具体评估结果见表2,其中A、B类场地共计14处,占总场地数的51.9%。密云、墙子路、八宝山、狼山、涑水、南孟、宁河、小寺冲等场地监测有效性相对较差,主要和场地监测环境相对较差、所处断层活动性相对较弱等有关,导致观测数据容易出现与地质运动背景不一致的情况。另外,古北口、镇罗营、南口、百善、京西实验场等场地所跨断裂以走滑运动为主,但目前仅有水准观测,无法有效监测断层的主要运动方式。

1.3 地下水位变化及地表沉降的影响评估

地下水位下降一方面可以造成区域局部发生显著的地表沉降,进而可能对周边的观测产生影响;另一方面,水位变化本身也可能对相关的观测直接造成影响,因此在分析过程中笔者同时考虑了上述两种影响过程。前人研究已经给出了1959—2016年研究区的浅层地下水位累积变化分布结果(Pang *et al.*, 2020; 窦甜甜等, 2022),在此基础上,笔者基于该区域覆盖相对完整的InSAR监测结果(史珉等, 2021),同时提取了2016—2018年地表沉降速率相对较高(大于50 mm/a)的区域(图2)。由于浅层地下水位变化结果是近60年的累积变化量,地表沉降速率仅为近几年较短时间内的结果,因此二者的高值区在细节上存在一定差异,但整体分布具有一致性,显示了超量开采地下水对区域地表快速沉降现象的控制作用。总体上来看,浅层地下水位下降和地表沉降最为突出的区域主要集中在研究区的中部及南部。

根据空间分布关系初步分析,密云、德胜口、南口、百善、八宝山、涑水、南孟、唐山等场地位于浅层地下水位累积下降最为显著的区域附近,可能会受其影响,其中百善、南孟等场地还同时位于近几年地表沉降较快的区域附近,受影响

表 2 北京及周边地区跨断层场地监测有效性评估

Tab. 2 Evaluation of the monitoring effectiveness of the cross-fault observation sites in Beijing and its adjacent areas

序号	场地	观测类型	监测断层	活动性质 (地质背景)	活动性质 (跨断层观测)	监测有效性
1	北石城	水准	北石城断裂	正断	正断	A
2	密云	水准	二甲峪—密云断裂	弱活动	逆断转正断	C
3	古北口	水准	古北口断裂	左旋走滑	弱活动	C
4	墙子路	基线、水准	墙子路断裂	左旋走滑	弱活动	C
5	张家台	基线、水准	程各庄断裂	正走滑	右旋正断	A
6	镇罗营	水准	程各庄断裂	正走滑	正断	C
7	张山营	基线、水准	大西山断裂	正断	正断	A
8	德胜口	基线、水准	南口山前断裂	正断	正断	A
9	南口	水准	南口—孙河断裂	正走滑	逆断转正断	C
10	百善	水准	南口—孙河断裂	正走滑	正断	C
11	燕家台	基线、水准	沿河城断裂	正断	正断	A
12	沿河城	水准	沿河城断裂	正断	正断	A
13	八宝山	基线、水准	八宝山断裂	逆断	逆断转正断	C
14	大灰厂	基线、水准	八宝山断裂	逆断	逆断	A
15	上万	基线、水准	黄庄—高丽营断裂	正走滑	正断	B
16	京西实验场	水准	黄庄—高丽营断裂	正走滑	逆断	C
17	小水峪	基线、水准	安营堡断裂	正断	右旋正断	A
18	土木	水准	孔涧—大石河断裂	正断	正断	A
19	狼山	水准	延矾盆地北缘断裂	正断	逆断	C
20	施庄	基线、水准	施庄断裂	正走滑	左旋	B
21	紫荆关	水准	紫荆关断裂	正断	正断	A
22	涞水	水准	涞水—高碑店断裂	不详	弱活动	C
23	南孟	水准	牛驼镇凸起南断裂	弱活动	正断转逆断	C
24	宁河	水准	桐城断裂	不详	逆断	C
25	小寺冲	水准	延矾盆地北缘断裂	正断	弱活动	C
26	唐山	基线、水准	唐山 5 号断裂	逆断	逆断	A
27	牛口峪	水准	八宝山断裂	逆断	逆断	A

程度可能更加严重。在此基础上，笔者进一步分析相关影响的时间过程，考虑到地表沉降产生和发展过程与地下水开采过程基本保持同步且略滞后（何庆成等，2006；杨艳等，2010，2013），因此可以利用地下水储量时序变化来表示地下水位、地表沉降的变化过程，并通过与跨断层观测数据的对比来分析地下水位、地表沉降等因素对跨断层场地的实际影响。在初步判定为受影响的场地中，密云、德胜口、南口、百善、八宝山、涞水、唐山等场地的观测数据并未表现出与地下水储量较为同步的变化过程，即未受其显著控制（图 3a），仅南孟场地受影响较为严重（图 3b），这可能主要与场地局部地质环境特征以及测桩

类型是否为基岩有关。进一步研究发现，除了南孟场地之外，京西实验场、大灰厂、上万、牛口峪等场地的观测背景变化与水储量的变化一致性也较好（图 3c）。上述场地周边虽然没有浅层地下水位显著下降区和地表快速沉降区，但是明显受到水储量变化的直接影响，造成这种现象的可能原因在后文做进一步讨论。综合上述地下水位变化及地表沉降对跨断层观测的实际影响程度，将南孟、京西实验场、大灰厂、上万、牛口峪 5 处场地定为 C 类，密云、德胜口、南口、百善、八宝山、涞水、唐山 7 处场地定为 B 类，其它 15 处场地定为 A 类，A 类场地数占总场地数的 55.6%。

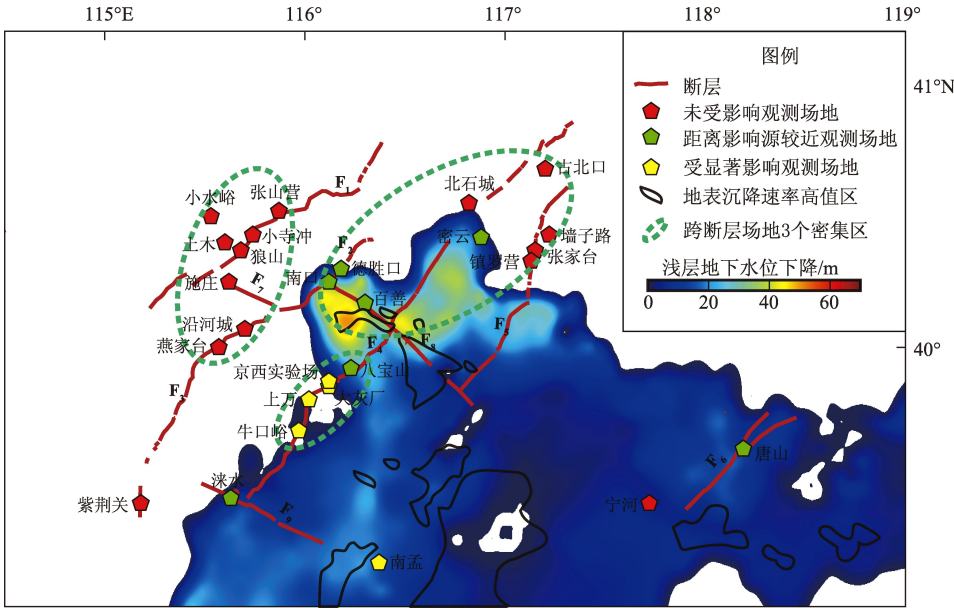


图2 北京及周边地区浅层地下水位下降区与地表沉降速率高值区
Fig. 2 Drawdown area of the shallow groundwater and high-rate areas of the surface subsidence in Beijing and its adjacent areas

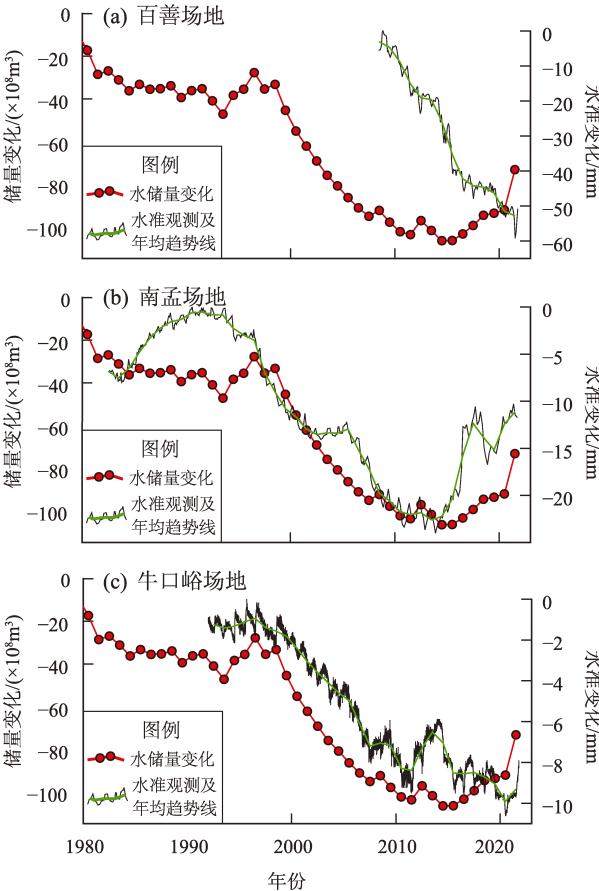


图3 地下水储量变化对跨断层观测场地的影响
Fig. 3 Influence of the water-reserve variation on the cross-fault-observation sites

2 地震预测效能评估

2.1 基于单测项单方法的预测效能定量评估

跨断层观测能否监测到可靠的地震前兆异常变化是场地评估中需要重点考虑的因素。历史震例资料的统计结果显示，一些跨断层观测在多次地震前都曾记录到显著的异常变化，并且异常主要以趋势转折、破年变、速率变化、超阈值变化等为主（曹建玲等，2016；陈长云等，2016；李瑞莎等，2016）。因此，针对单个场地的单个测项，分别利用趋势转折、破年变、速率、阈值等方法的不同算法（洪敏等，2019）进行相应特征信息的提取，并利用 R 值检验方法进行最优预测指标的自动确定以及预测效能的定量评估（中国地震局监测预报司，2020）。

R 值检验是目前在地震预报领域应用最为广泛的一种效能评估方法，综合考虑了有震报准率、无震报准率、漏报率、虚报率等评估因素，通过不同因素的组合和折中给出相应的效能评估结果（国家地震局科技监测司，1990）。由于上述因素并非完全独立，所以 R 值检验有多种等价的表达形式，常用的一种形式如下：

$R = \text{有震报准率} - \text{预报占时率} =$
 $(\text{报对的地震次数} / \text{应预报的地震总次数}) - (\text{预报}$
 $\text{占用时间} / \text{研究的总时间}) \quad (3)$

当指定了目标震级范围、空间范围及预报时窗后,通过调整不同的异常阈值就可以对应不同的有震报准率和预报占时率组合,进而获得不同的 R 值,从中选择 R 值最高所对应的异常阈值作为该指定预报规则下(特定的震级、空间、时间范围)的相对最优阈值。综合所有预报规则下的评估结果,就可以确定最优的异常阈值、相应的预报规则及预测效能。

选取了1970—2020年北京及周边地区($38.5^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ} \sim 119^{\circ}\text{E}$)5级以上地震用于效能检验,共计16次地震事件。首次为1976年4月6日内蒙古和林格尔6.2级地震,末次为2020年7月12日河北唐山5.1级地震,1976年7月28日河北唐山7.8级、滦县7.1级以及震后短期内5级以上余震作为1次地震事件,1989年10月18—19日山西大同5级震群同样作为1次地震事件。

R 值同时考虑了有震报准率和预报占时率,表示扣除了随机概率后的预报成功率,当 $R=0$ 时表示预报没有起作用。一般除了考虑 R 值大小外,还需要考虑其信度。同样的 R 值,当其基于的地震次数不一样时,信度也不一样,因此需要考虑 R_0 值,即保证97.5%的置信度的最低 R 值。当 $R \geq R_0$ 时,可以认为这个 R 值至少有97.5%的置信度(国家地震局科技监测司,1990)。笔者依据通过效能及置信度检验($R > 0$ 且 $R \geq R_0$)的测项-方法数来评估场地预测配套性,通过数越多表明预测配套性越好,越有利于在实际业务应用中综合评估地震危险性:通过数 ≤ 4 的场地定义其预测配套性为C类;5 \leq 通过数 ≤ 10 的场地定义为B类,通过数 > 10 的场地定义为A类。

众多通过检验的测项-方法中最优预测指标的效能同样具有重要的评估意义,这代表了“王牌”手段的预测能力:所有测项-方法均未通过检验,或最优测项-方法的 R 值通过检验,但 $R \leq 0.3$ 的场地定义其最优预测指标效能为C类;最优测项-方法的 R 值通过检验,并且 $0.3 < R \leq 0.5$ 的场地定义为B类;最优测项-方法的 R 值通过检验,并且 $R > 0.5$ 的场地定义为A类。

表3给出了基于单测项单方法的场地预测效能

评估结果,场地预测配套性A类有6处场地,B类5处,合计占总场地数40.7%;最优预测指标效能A类有8处场地,B类9处,合计占总场地数的63.0%,比预测配套性的比例更高,表明部分场地虽然异常配套性较差,但是具备一些“王牌”的预测手段,仍然可以在实际的预报业务中发挥重要作用。

2.2 基于区域变形配套性的预测效能评估

在区域统一构造应力场作用下,关联的断层系统往往会出现协同性的运动,显示出对区域应力场变化的敏感响应。通过监测关联断层系统整体的断层运动变化,有助于了解区域大范围、长时间的应力场调整过程,对于准确研判未来一段时期区域整体的强震趋势具有重要意义。

跨断层形变观测在监测断层运动方面一直发挥着重要作用,目前主要是基线和水准观测两类。基线观测由于所跨断层走向、基线方位、断层运动方式等的不同,直接进行有物理含义的区域综合难度较大,而水准观测因为只反映断层垂向上的运动变化,所以是进行区域综合比较好的选择。

北京及周边地区跨断层场地都具有水准观测,为开展基于区域变形配套性的预测效能评估提供了基础。笔者使用垂直形变速率合成方法进行计算(焦青,周俊萍,1998;苏琴,2005;张晶等,2012),按照跨断层场地的区域集中程度、地质背景以及构造相关性等,主要分成首都圈西北部、首都圈东北部、八宝山断裂相关区域3个区域(图2)开展计算分析。首都圈西北部包含狼山、施庄、土木、小水峪、沿河城、燕家台、张山营等场地(小寺冲场地观测时间较短,未参与合成计算);首都圈东北部包含北石城、德胜口、古北口、密云、南口、墙子路、张家台、镇罗营等场地(百善场地数据质量较差,未参与合成计算);八宝山断裂相关区域包含八宝山、大灰厂、牛口峪、京西实验场、上万等场地,区域南部相对零散的场地未进行考虑。

3个区域的垂直形变速率合成结果表现出明显差异,首都圈西北部的计算结果呈现2个显著的活动时段(图4a):一是1970—1979年,在该时段末期发生了1976年唐山7.8级、滦县7.1级地震及多次5级以上余震,该时段区域断层系统整体相对活动反映了唐山、滦县大地震前区域孕震应力

表 3 基于单测项单方法的北京及周边地区场地预测效能评估结果

Tab. 3 Evaluation of forecasting effectiveness of the cross-fault sites based on the single observation item or method in Beijing and its adjacent areas

序号	场地	通过检验的 测项 - 方法数	最优测项/方法	最优 R 值	对应 R_0 值	场地预测 配套性	最优预测 指标效能
1	北石城	0	—	—	—	C	C
2	密云	3	水准 4 - 3 (k) /速率类	0.44	0.34	C	B
3	古北口	8	水准 N - S (k) /速率类	0.49	0.37	B	B
4	墙子路	32	水准 (XS) EN - WS (k) /阈值类	0.49	0.22	A	B
5	张家台	28	水准 (XS) N - S (k) /速率类	0.61	0.22	A	A
6	镇罗营	2	水准 E - W /阈值类	0.50	0.37	C	B
7	张山营	7	基线 (J) E - W (k) /速率类	0.64	0.28	B	A
8	德胜口	13	水准 (XS) E - W (k) /速率类	0.60	0.40	A	A
9	南口	0	—	—	—	C	C
10	百善	0	—	—	—	C	C
11	燕家台	29	水准 S - W1 (k) /速率类	0.61	0.22	A	A
12	沿河城	6	水准 2 - 1 (k) /阈值类	0.52	0.37	B	A
13	八宝山	3	基线 (J) S - N (k) /速率类	0.42	0.28	C	B
14	大灰厂	1	基线 (CJ) E - N (k) /破年变	0.27	0.27	C	C
15	上万	2	基线 (CJ) E - W (k) /速率类	0.43	0.34	C	B
16	京西实验场	0	—	—	—	C	C
17	小水峪	15	基线 (XJ) E1 - W1 (k) /速率类	0.43	0.25	A	B
18	土木	2	水准 5 - 1 (k) /阈值类	0.52	0.34	C	A
19	狼山	0	—	—	—	C	C
20	施庄	5	基线 (J) E - W (k) /速率类	0.50	0.22	B	B
21	紫荆关	16	水准 2 - 1 (k) /阈值类	0.59	0.34	A	A
22	涞水	0	—	—	—	C	C
23	南孟	0	—	—	—	C	C
24	宁河	4	水准 1 - 2 (k) /速率类	0.19	0.16	C	C
25	小寺冲	0	—	—	—	C	C
26	唐山	9	基线 3 - 4 (k) /速率类	0.45	0.28	B	B
27	牛口峪	1	水准 E - W /破年变	0.74	0.37	C	A

环境变化以及后续的震后调整；二是 1985—1999 年，持续时间相对较长，期间区域内虽未发生大地震，但是中强地震持续活跃，发生了 9 次 5 级以上地震，主要集中在山西带北段和张渤带西段。之后区域断层运动相对平稳，期间地震活动也相对平静，仅发生 1 次 2006 年文安 5.1 级地震；随后 2011 年日本 9.0 级地震对该区域产生了持续深远的影响，期间区域内 5 级地震长时间平静可能与日本地震震后引起的区域应力、断层运动状态的调整过程有关（张贝等，2015）；2020 年唐山 5.1 级地震前后，区域断层运动系统再次表现出一定的活跃迹象，可能指示了日本地震的影响正趋于

结束。整体来看，该区域的断层垂直形变速率合成结果对于区域应力状态调整较为敏感，能够相对准确地反映区域内地震活动趋势，各观测场地的变形配套性相对较好。

首都圈东北部的计算结果同样呈现两个显著的活动时段（图 4b）：一是 1976—1979 年，主要反映了唐山、滦县大地震后的调整过程，并且受震后影响的程度明显高于首都圈西北部的结果，而对于震前应力环境的演化过程反而不是特别敏感；二是 1985—1999 年，显示了与首都圈西北部类似的演化过程。之后该区域结果同样显示了相对平稳的运动状态以及日本地震对于区域

应力、断层运动状态的影响; 该区域垂直形变速率合成结果在 2021 年下半年表现为高值变化, 可能与 2021 年北京市出现的近几十年内最强降雨这类罕见气象条件有关, 属于干扰因素的影响。因此, 对比首都圈西北部的结果发现, 本区域结果对个别区域应力调整过程不敏感, 并且易受干扰因素影响, 表明该区域各场地的区域变形配套性略差。

与前两个区域相比, 八宝山断裂相关区域的计算结果从 1990 年前后开始整体波动加剧, 并未表现出与区域应力场调整以及周边中强地震明显的对应关系 (图 4c)。从针对各场地受地下水位变化及地表沉降影响的分析结果可知, 该区参与计算的多个场地受影响严重 (图 2), 计算结果的

不稳定可能与地下水储量快速变化, 导致不同观测场地出现相应的调整运动有关 (图 3c)。另外, 该区域结果同样受到 2021 年极端天气的影响, 并且受影响程度比首都圈东北部的结果更严重。整体来看, 八宝山断裂相关区域的观测场地其区域变形配套性所反映的效能最差。

在上述分析基础上, 笔者采用类似 2.1 节的方式进行区域垂直形变速率合成结果的预测效能定量评估 (表 4), 定量评估结果与定性分析的认识一致。综合上述结果, 将首都圈西北部参与计算场地的区域变形配套性定为 A 类, 首都圈东北部参与计算场地定为 B 类, 八宝山断裂相关区域参与计算场地以及未参与上述 3 个区域计算的其它场地均定为 C 类。A 类场地 7 个、B 类场地 8 个, 合计占总场地数的 55.6%。

表 4 基于区域变形配套性的预测效能定量评估

Tab. 4 Quantitative evaluation of the forecasting effectiveness based on regional deformation compatibility

序号	分区	通过检验的方法数	最优方法	最优 R 值	对应 R_0 值
1	首都圈西北部	3	速率类	0.59	0.28
2	首都圈东北部	4	速率类	0.48	0.28
3	八宝山断裂相关区域	0	—	—	—

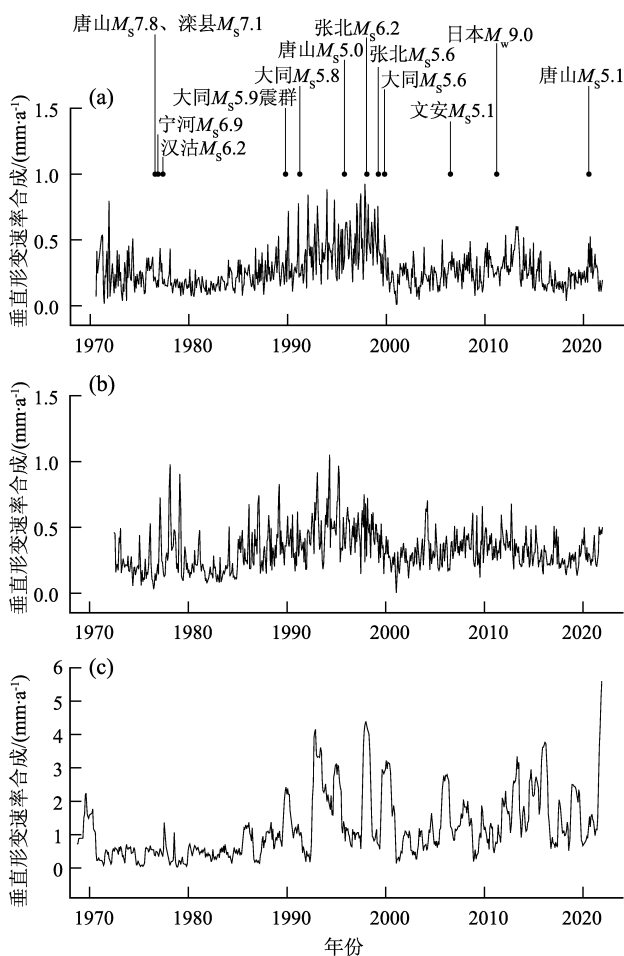


图 4 首都圈西北部 (a)、东北部 (b) 和八宝山断裂相关区域 (c) 垂直形变速率合成结果

Fig. 4 Synthetic results of the vertical deformation rate in the northwest (a), northeast (b), and Babaoshan fault (c) of Beijing capital circle

3 讨论

图 5 给出了综合场地监测条件以及预测效能的北京及周边地区跨断层场地最终评估结果。该结果表现出几个显著特点:

(1) 跨断层场地的监测条件对于其地震预测效能具有较大影响, 监测条件相对较差的场地其预测效能各项评估指标普遍偏低。

(2) 区域地质构造环境的差异对场地监测条件有较大影响, 进而影响其预测效能。整体来看, 位于山地基岩区的场地观测条件相对较好, 预测效能普遍较高, 位于平原区沉积层之上的场地则容易受各种干扰因素影响, 导致监测条件较差, 预测效能普遍偏低。

(3) 区域局部的水文地质条件差异对其附近场地受地下水超采、强降雨等影响的显著程度可能具有重要控制作用。实际观测数据受地下水储

量变化显著影响的京西实验场、大灰厂、上万、牛口峪等场地,在空间上并未处于浅层地下水位下降和地表沉降最为突出的区域(图2)。基于区域水文地质研究结果分析(雷坤超等,2016; Lei *et al.*, 2021),造成这种现象的原因可能与上述场地位于单一砂砾含水层上方有关,这同时造成了上述场地对于强降雨影响也较为敏感。

前人研究已经揭示了不同观测台站或场地的监测能力及其对地震前兆异常的敏感程度存在显著差异,台站或场地所处的断裂构造位置可能起到主要作用,特别是在断裂端点、拐点与交汇点

等构造复杂、应力较易集中的区域,观测台站较为敏感(车用太,1990;焦明若,张国民,1998;刘琦等,2016),而且不同运动性质的断层优势的敏感观测区域可能也不同(马栋等,2019),这些认识也得到了岩石破裂实验等的支持(马瑾等,2007)。本文的研究进一步显示了区域地质构造、水文地质条件等对观测台站或场地的监测能力及预测效能等的影响,因此在后续针对北京及周边地区观测站网布局的优化改造中,除了考虑断裂构造等因素,区域地质构造、水文地质条件等同样需要重点考虑。

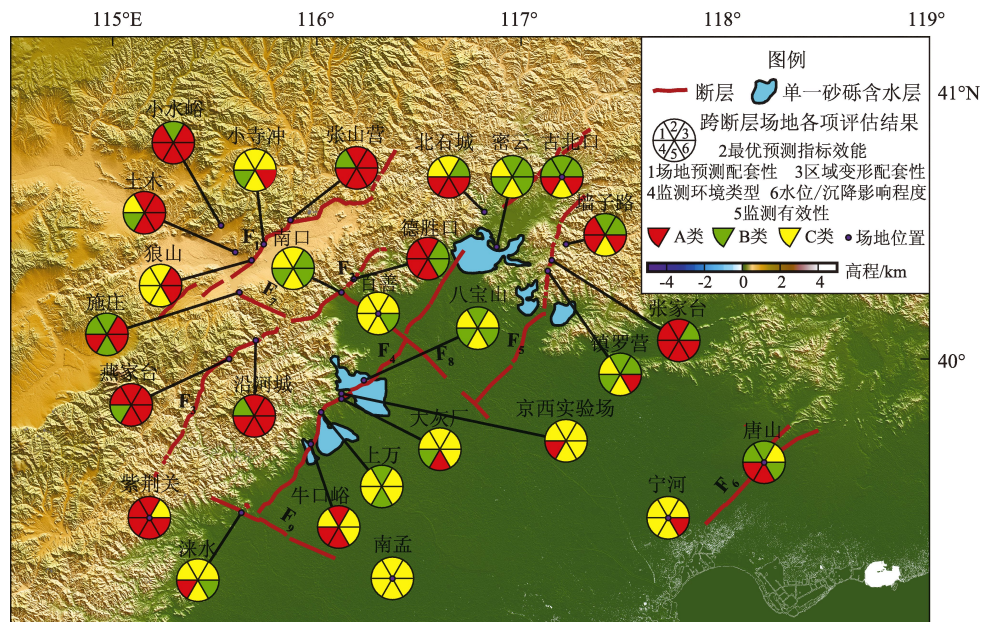


图5 北京及周边地区跨断层场地综合评估结果

Fig. 5 Results from the comprehensive assessment of the cross-fault sites in Beijing and its adjacent areas

4 结论

本文针对北京及周边地区的跨断层观测场地尝试综合考虑监测条件、预测效能进行评估,分别从监测环境、监测有效性、地下水位变化/地表沉降影响以及场地预测配套性、最优预测指标效能、区域变形配套性等方面开展了详细的研究和分析讨论。基于综合评估结果,主要获得以下结论:

(1) 北京及周边地区的跨断层场地布设对区域内大多数主要断层具有较好的监测能力,并有一定的地震预测效能。

(2) 八宝山—黄庄—高丽营断裂多数场地(例如八宝山、京西实验场、大灰厂、上万、牛口峪等)目前监测条件相对较差,预测效能普遍偏低,建议针对该断裂选择其它合适的断层段位置补充新建若干跨断层观测场地。

(3) 基于评估结果,建议停测百善、南孟、宁河、涞水、京西实验场、大灰厂等预测效能较低且监测条件一般的场地。

(4) 考虑所跨断层的主要运动方式,建议古北口、镇罗营、南口等场地增加基线观测,以有效监测所跨断层的断层运动。

(5) 后续若要补充新建跨断层形变观测场地,在场地选址时除了考虑所跨断裂基本活动特性之

外,还需考虑区域地质构造、水文地质条件等因素。

感谢北京市地震局刘桂萍研究员、中国地震局地震预测研究所孙汉荣研究员、薛兵研究员、云南省地震局洪敏正高级工程师、山西省地震局刘瑞春高级工程师、河北省地震局马栋高级工程师、中国地震局第一监测中心陈长云高级工程师、中国地震局第二监测中心李瑞莎高级工程师在本项工作开展及文章撰写过程中给予的意见建议。

参考文献:

- 薄万举,谢觉民,郭良迁. 1998. 八宝山断裂带形变分析与探讨[J]. 地震, 18(1): 63-68.
- 曹建玲,贾晓东,李腊月,等. 2016. 华北地区跨断层前兆异常特征综述[J]. 地震, 36(4): 61-75.
- 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.
- 陈长云,郑智江,李腊月,等. 2016. 南北地震带中南段典型强震震前跨断层形变特征分析[J]. 地震, 36(4): 47-60.
- 窦甜甜,程惠红,周元泽,等. 2022. 华北平原地下水开采对区域地震活动性的影响[J]. 地球物理学报, 65(8): 2931-2944.
- 高文学,马瑾. 1993. 首都圈地震地质环境与地震灾害[M]. 北京:地震出版社.
- 郭海朋,白晋斌,张有全,等. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 44(6): 1115-1127.
- 国家地震局科技监测司. 1990. 地震分析预报方法程序指南[M]. 北京:地震出版社.
- 郝书俭,尤惠川. 2001. 唐山活动断层的浅层地震精细探测[J]. 地震地质, 23(1): 93-97.
- 何庆成,刘文波,李志明. 2006. 华北平原地面沉降调查与监测[J]. 高校地质学报, 12(2): 195-209.
- 洪敏,张晶,邵德盛,等. 2019. 跨断层形变智能化资料处理与量化预测指标[C]//2019年中国地球科学联合学术年会论文集(八)——专题21:活动地块边界带强震机理与预测、专题22:中国地震科学实验场. 北京, 26.
- 蒋铭,马宗晋. 1985. 华北第三、四地震活跃期的对比[J]. 地震, 5(6): 5-11.
- 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.
- 焦青,周俊萍. 1998. 跨断层垂直位移速率的动态演化特征与强震的关系[J]. 地震, 18(3): 265-273.
- 雷坤超,罗勇,陈蓓蓓,等. 2016. 北京平原地区地面沉降分布特征及影响因素[J]. 中国地质, 43(6): 2216-2225.
- 李腊月,季灵运,李玉江,等. 2016. 基于跨断层测量的鲜水河断裂带现今活动特征及其与强震关系研究[J]. 地震学报, 38(5): 739-750.
- 李瑞莎,张希,唐红涛,等. 2016. 青藏块体东北缘跨断层形变典型震例总结与预测判据指标分析[J]. 地震, 36(4): 35-46.
- 梁芳,孙建宝,沈正康,等. 2013. L波段 InSAR 数据观测的北京及其周边 2007—2010 年间累计地壳形变基本特征[J]. 地震, 33(4): 43-54.
- 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.
- 陆明勇,黄宝森,刘天海,等. 2011. 首都圈跨断层流动形变观测资料映震能力及场地监测能力分析[J]. 地震, 31(3): 121-134.
- 陆明勇,牛安福,黄宝森,等. 2013. 首都圈地区跨断层流动形变监测场地优化布设探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 33(S1): 1-4, 15.
- 陆明勇,于海生,李志雄,等. 2018. 华北地区跨断层流动形变监测场地优化初探[J]. 中国地震, 34(4): 837-844.
- 马栋,马利军,侯晓真,等. 2019. 华北地区地壳形变连续观测灵敏台站研究[J]. 地震研究, 42(3): 405-410.
- 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.
- 史珉,宫辉力,陈蓓蓓,等. 2021. Sentinel-1A 京津冀平原区 2016—2018 年地面沉降 InSAR 监测[J]. 自然资源遥感, 33(4): 55-63.
- 苏琴. 2005. 川滇菱形块体各边界垂直形变速率与断层活动特性[J]. 四川地震, (1): 43-47.
- 孙启凯,池国民,徐东卓. 2017. 首都圈地区地壳垂直形变特征及剖面分析[J]. 大地测量与地球动力学, 37(5): 497-501.
- 徐锡伟,吴卫民,张先康,等. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震[M]. 北京:科学出版社.
- 杨海盟,戴俊生,汪必峰,等. 2014. 牛驼镇凸起发育过程[J]. 东北石油大学学报, 38(6): 22-29, 91.
- 杨艳,贾三满,王海刚,等. 2013. 北京规划新城地面沉降影响分析[J]. 城市规划, 37(11): 67-71.
- 杨艳,贾三满,王海刚. 2010. 北京平原地区地面沉降现状及发展趋势分析[J]. 上海地质, 31(4): 23-28.
- 杨艳. 2015. 京津冀区域地面沉降灾害防治思考[J]. 城市地质, 10(1): 1-7.
- 尤惠川,徐锡伟,吴建平,等. 2002. 唐山地震深浅构造关系研究[J]. 地震地质, 24(4): 571-582.
- 查明,尉亚民,高长海,等. 2011. 牛驼镇凸起南段潜山勘探潜力分析[J]. 岩性油气藏, 23(2): 10-14.
- 张贝,张怀,石耀霖. 2015. 有限元模拟弹性位错的等效体力方法[J]. 地球物理学报, 58(5): 1666-1674.
- 张国民,马宗晋,蒋铭. 1988. 华北强震规律的研究[J]. 中国地震, 4(3): 66-70.
- 张晶,刘峡,方颖,等. 2012. 日本 9.0 级地震前后华北形变场变化特征与地震趋势分析[J]. 地震, 32(2): 64-72.
- 张世民,王丹丹,刘旭东,等. 2007. 北京南口—孙河断裂带北段晚第四纪活动的层序地层学研究[J]. 地震地质, 29(4): 730-743.
- 中国地震局监测预报司. 2020. 地震危险性判定技术方法系列丛书——形变分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社.

- Bai Z, Wang Y, Balz T. 2022. Beijing land subsidence revealed using PS-InSAR with long time series TerraSAR-X SAR data[J]. *Remote Sensing*, 14(11):2529.
- Lei K, Ma F, Chen B, *et al.* 2021. Three-dimensional surface deformation characteristics based on time series InSAR and GPS technologies in Beijing, China[J]. *Remote Sensing*, 13(19):3964.
- Li Z, Yu C, Xiao R, *et al.* 2022. Entering a new era of InSAR: advanced techniques and emerging applications[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 5(1):1-4.
- Pang Y, Zhang H, Cheng H, *et al.* 2020. The modulation of groundwater exploitation on crustal stress in the North China Plain, and its implications on seismicity [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 189:104141.
- Zhang T, Shen W, Wu W, *et al.* 2019. Recent surface deformation in the Tianjin area revealed by Sentinel-1A data[J]. *Remote Sensing*, 11(2):130.

Evaluation of the Cross-fault Observation Network in Beijing and Its Adjacent Areas

LIU Qi¹, LI Layue², HU Leyin³

(1. *Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

(2. *The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

(3. *Beijing Earthquake Agency, Beijing 100080, China*)

Abstract

Beijing and its adjacent areas are characterized by developed economy, dense population and frequent historical strong earthquakes. In order to accurately study and judge the seismic risk in Beijing and its adjacent areas and reduce the disaster risk that may be caused by earthquakes, it is necessary to first understand the effectiveness of the current observational sites in this region. For this reason, this paper comprehensively considers the monitoring conditions and the effectiveness of earthquake forecasting of the cross-fault sites to design the evaluation scheme of the observational network. This paper studies the monitoring environment, the monitoring effectiveness, the effect of the groundwater level change and the surface subsidence, the matching of forecasting, the effectiveness of the optimal forecasting index and the matching of regional deformation. This paper proposes the comprehensive evaluation results and suggestions for the optimization of the observational network. The distribution of the current cross-fault sites in Beijing and its adjacent areas have good monitoring capacity for most of the major faults in the region and have good earthquake forecasting efficiency. However, the monitoring conditions of most observational sites on the Babaoshan-Huangzhuang-Gaoliying fault are relatively poor, and their forecasting efficiency is generally low. It is advisable to select other locations on the fault to supplement the observational sites. In addition to the fault structure, regional geological settings and hydrogeological conditions have an important impact on the effectiveness of the observational site, and need to be taken into account when selecting new sites.

Keywords: cross-fault observation; earthquake forecasting effectiveness; monitoring conditions; groundwater; tectonic conditions; Beijing