

Feasibility Study on Using GNSS Observation to Monitor Crustal Movement in Beijing

Wu Peizhi¹ Hu Leyin^{1*} Xu Ping¹ Li Mingxiao² Lu Mingyong³
Xing Chengqi¹ Zhu Hongbin¹ Fan Zhiyong¹ Liang Fang¹ Huang Yurui¹
Ji Hong¹ Zheng Yiwen¹ Shi Yufang¹

1. Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing;
2. China Earthquake Networks Center, Beijing;
3. National Earthquake Response Support Service, China Earthquake Administration, Beijing,

Abstract: For the Beijing Continuous GNSS stations, the site distances are small and most of the stations are soil-based. The construction of the stations do not fully comply with the earthquake monitoring standards and the crustal movement is in a very low level. Considering all the above factors, we need study the feasibility to use the Beijing Continuous GNSS stations for monitoring the crustal movement in Beijing. In this paper, we carried out some preliminary study on respects of error, disturbance, point, line and area based on a decade observational data. The results show that, the error can be controlled by reasonable data processing methods and abandoning observations with large error. By identifying and excluding some interference, we carried out the site displacement analysis and found out the development process before and after the Tokyo 8.0 earthquake. By analyzing the changing of the baselines between

GNSS stations we acquired the movement characteristics of two active fault. By analyzing the area changing, we realized some relationship among the area changing, comprehensive Precursory information and mean moving rate of the faults. According to the preliminary results, we think the Continuous GNSS stations can be used for earthquake monitoring in Beijing.

Key words: GNSS; Error; Disturbance; Fault; Earthquake Monitoring

Received: 2020-06-30; Accepted: 2020-07-09; Published: 2020-07-20

GNSS 监测北京地区地壳运动的可行性研究

吴培稚¹ 胡乐银^{1*} 徐平¹ 黎明晓² 陆明勇³ 邢成起¹
朱红彬¹ 樊智勇¹ 梁芳¹ 黄雨蕊¹ 季红¹ 郑轶文¹ 施玉芳¹

1. 北京市地震局, 北京;
2. 中国地震台网中心, 北京;
3. 中国地震应急搜救中心, 北京

邮箱: huleyin@bjseis.gov.cn

摘要: 由于北京市 GNSS 连续观测台网孔径较小、土层站较多、站点建设不完全符合地震监测规范、地壳运动水平较低等原因, 能否用 GNSS 监测北京地区的地壳运动, 需要作可行性研究。本文利用十多年实际观测资料, 在误差、干扰、点、线、面等几个方面进行了初步研究。结果表明: 误差可由解算方法和大误差测值的舍弃得到一定程度控制, 通过识别并排除部分干扰, 对测站的位移进

行分析得到了日本9级大地震有关的远场地壳形变变化过程,通过基线变化分析得到了测区内两条活断层运动特点,通过面积元素分析得到了面积变化与前兆综合信息量、断层活动年变率存在可比性。初步认为,在采取较为严格措施后,GNSS观测能用于北京地区的地震监测。

关键词: GNSS; 误差; 干扰; 断层; 地震监测

收稿日期: 2020-06-30; 录用日期: 2020-07-09; 发表日期: 2020-07-20

Copyright © 2020 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1 引言

北京市的面积不大,GNSS连续观测台网孔径较小,大部分测站建在土层上,站点建设不完全符合地震监测规范,北京地区地壳活动水平不高,数十年的跨断层水准、基线测量结果表明,北京地区断层活动的年速率小于1毫米。能否利用GNSS监测北京市的地壳运动,能否监测到离城区最近、规模不大的南口-孙河、黄庄-高丽营两活动断裂的运动,需要作可行性研究。北京及周边地区有22个GNSS连续观测站,其中17个测站已工作十年以上,分别是房山、十三陵、蓟县、测绘院、朝阳、昌平、大兴、东三旗、牛口峪、牛栏山、密云、平谷、石景山、汤河口、西集、延庆和斋堂。本文利用这17测站观测数据,以监测北京及邻区的地壳运动和地震研究的需要为目标,在误差、干扰、点、线、面等几个主要方面,选择简单的计算方法,作可行性研究。

2 假设

在数据处理时，大地测量和跨断层测量采用的数学假设不完全相同。把观测网络内邻近两测点间的变化视为均匀时，可称之为“均匀假设”。均匀假设中，空间变化率可由测值差除以两点间距离求得，均匀假设可以大面积组网。把断层的两盘视作刚体，测线两端点间变化由断层处突变造成的，可称之为“突变假设”。突变假设中，不存在空间变化率的概念，在野外条件下，上下盘为刚体的假设是很高要求。

“块体假设”，即把研究区域分成若干块，块体内部运动比较均匀一致，块体之间存在不同于块体内的运动，块体假设多见于 GNSS 大区域的研究 [1]。图 1 是北京地区 GNSS 连续观测站空间分布图，北西向孙河—南口活动断裂和北东向黄庄—高丽营活动断裂交汇于东三旗附近，它们把区域分成四块。本文尝试利用断裂周围 GNSS 连续站的观测数据，研究几十公里量级的断层活动。

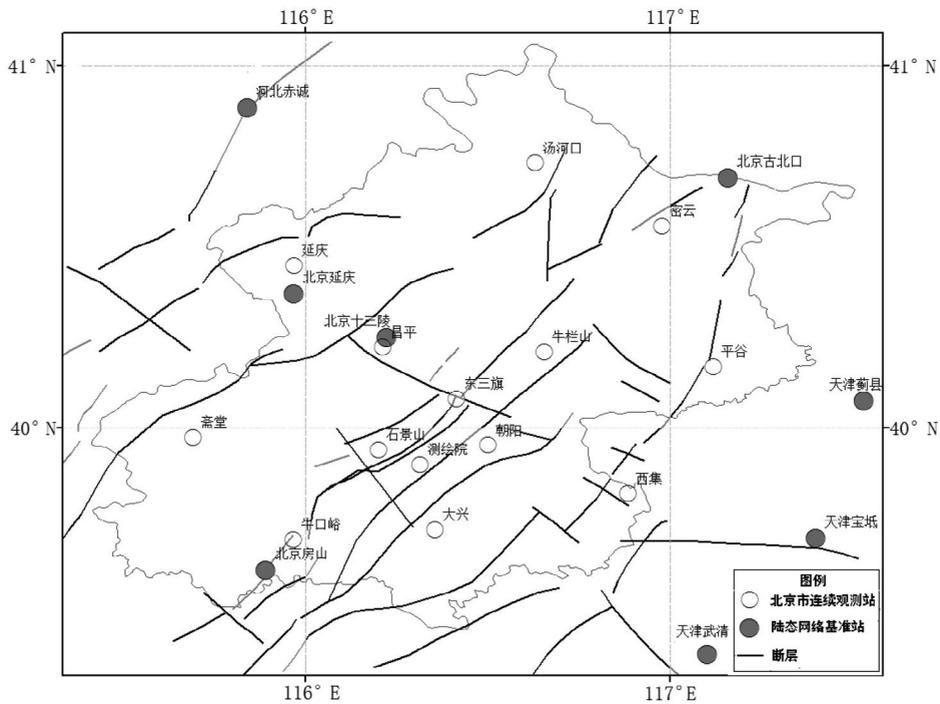


图 1 北京市 GNSS 连续观测站及断裂分布图

Figure 1 Continuous GNSS station and fault distribution in Beijing

尺度问题是地震研究中一个重要问题,用形变、流体、电磁等多个单站的前兆观测数据构建大尺度的时空演化,有时困难很多,其中一个重要原因是测站之间用于比较的坐标系不是单一的。为了取得可比性,GNSS观测的解算结果基于同一参考框架,各测站坐标处于同一个坐标系中,这个特点对研究大尺度时空演化非常有利,本文尝试用均匀假设研究北京市及邻近地区地壳运动的整体特点。

3 可行性研究

GNSS监测地壳运动,取得原始观测数据解算结果后,测站坐标的应用可分为误差、干扰、点、线、面等几个方面,其中误差和干扰排除带有基础性,点、线、面是GNSS测站组合的三大基本类型,它在数量上可分为单站、双站、多站,空间上可分为点、线、面、体。依据这三大类型,本文采用简单计算方法,进行监测北京地区地壳运动的可行性研究。

3.1 误差

影响GNSS测站坐标定位误差的因素很多,我们希望把误差控制在需要的范围内,有些规律性因素是可以利用的。如解算方法和解算过程的不同,误差大小存在系统性差异;日值误差大于周值误差,周值误差大于月值误差;测站误差具有个性化特点;夏天的误差平均大于冬天误差等[2][3]。在传统的测量计算中,大误差的测值是可以舍去的,这种现象也存在于GNSS观测中。图2是十三陵站三个分量十多年日值误差的变化曲线(据湖北省地震局解算结果),不难看出,误差是变化的,有的误差还很大,取误差平均值的两倍为舍弃标准,结果见表1,在6000多个样本,舍弃了60个样本,改正后日值误差的标准差减小到原来的一半,日值的标准差均得到了改善。

表 1 十三陵站弃大误差测值效果统计表

Table 1 Statistics on the effect of giving up large error measurements at the Shisanling Station

参数名称	N 分量 (m)	E 分量 (m)	U 分量 (m)
改正前日值标准差	0.0559	0.1472	0.0101
改正后日值标准差	0.0558	0.1470	0.0101
改正前日值误差的标准差	0.0011	0.0013	0.0032
改正后日值误差的标准差	0.0004	0.0005	0.0015

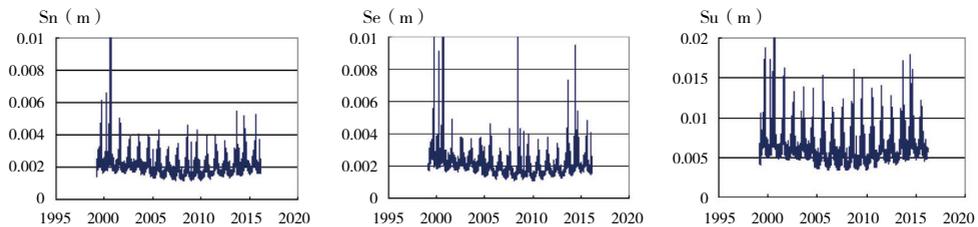


图 2 十三陵站日值误差变化曲线

Figure 2 Variation of daily value error of Shisanling Station

3.2 干扰

在北京 GNSS 连续观测台网工作的十多年里，观测到了多种的地表干扰，主要有维护、迁址、冻土、树木、沉降、年周期、建筑施工等，文献 [4] 给出了这些干扰的识别和改正，文献 [5] 给出了沉降干扰的识别和改正。大型建筑施工引起地基变化的影响，可根据现场记录进行识别和改正。针对不同需求、观测环境变化、辅助观测手段的丰富及认识的提高，干扰的识别和改正会更加深入、更加全面 [6]。

3.3 点

GNSS 测站坐标值的变化能反映地表运动，可用站点坐标的三个分量、二维的水平矢量、三维的空间矢量、速率变化等表示测站的地表运动 [7]。图 3 是 1999 年至 2015 年房山、十三陵、蓟县三个站 E 分量的变化曲线（据湖北省地震局的解算结果，全球参考框架，各测站已作去线性趋势预处理），这是目前北京 GNSS 连续观测台网观测到的与 2011 年 3 月 11 日日本 9 级地震有关的远场地

壳形变变化。

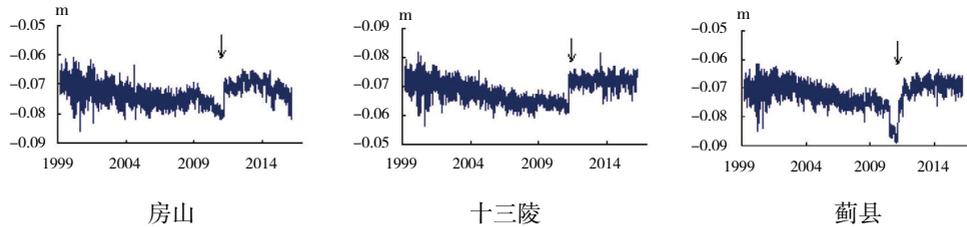


图3 2011年3月11日日本9级地震在E分量上反映

Figure 3 Response of E component to the magnitude 9 earthquake in Japan on March 11, 2011

3.4 线

GNSS 两测站可连成一基线，基线变化可称为线变化，两站之间的线变化可用一维的坐标变化、两维的水平距离、三维的空间距离、线应变、速率等参数表示，北京网内十几个站，两两匹配，可得到数百个组合。表2节选自文献[8]，用地质方法得到了年平均滑动速率，南口—孙河断裂西北段为 0.3 mm/a；黄庄—高丽营断裂北段年 0.1–0.2 mm/a。断裂的这种变化在时间上带有长期背景性质。

表2 首都圈第四纪活动断裂基本特征表

Table 2 Table of basic characteristics of Quaternary active faults in the Capital area

编号	断裂名称	长度 (km)	产状	活动性质	段落	晚更新世以来活动段落	最新活动时代	平均滑动速率 (mm/a)
F30	南口—孙河断裂	60	NW/SW.NE	左旋正断	2	西北段	Q ₄	0.3
F32	黄庄—高丽营断裂	130	NE/SE	右旋正断	3	北段	Q ₄	0.1–0.2

北京市 GNSS 连续台网观测始于 2003 年末，使用十年左右数据算得年平均速率具有中期性质。数据处理，第一步在全球框架下 GNSS 解算得的各测站坐标，第二步变换成北京区域基准下测站坐标，第三步形成各测站坐标的时间序列后，用线性回归的斜率来表示年平均速率。自变量时间以年为单位，因变量为两测站的坐标差，斜率即为线性回归斜率所求得年平均速率，结果表明，

水平分量年平均速率的误差小于 0.1 mm/a (考虑到个别土层站垂直分量受沉降影响大, 本文只用水平分量计算。线性回归均通过了线性假设检验)。表 3 以十三陵站为起算点, 算得与石景山、斋堂、测绘院、大兴、朝阳、牛栏山六个站组成基线的年平均速率。不难看出, 石景山和斋堂可归为西南块, 测绘院和大兴归为东南块, 朝阳和牛栏山归为东北块, 这四个块体与地质上 F30 和 F32 交汇形成四个块体大体重合。按块体假设算得, F30 西北段年平均速率 1.57 mm/a, 左旋张性, F30 东南段年平均速率 1.25 mm/a, 左旋张性。F32 北段年平均速率 0.80 mm/a, 右旋压性, F32 南段年平均速率 0.33 mm/a, 左旋张性。与表 1 结果比较, 由 GNSS 算得的 F30 西北段活动量约为表 1 的 5 倍, F32 北段活动量约也为表 1 的 5 倍。F30 西北段活动量与 F32 北段活动量的两倍, 这与表 1 结果是相同的。

表 3 十三陵站为起算点的基线年平均速率表

Table 3 Average annual rate of baseline with the Shisanling station as the reference station

测站组合	N 分量 (mm/a)	E 分量 (mm/a)	基线长 (km)	测站岩性	分组	备注
石景山—十三陵	1.24	0.11	35	土层—基岩	西南块	
斋堂—十三陵	1.16	0.76	67	土层—基岩	西南块	
牛栏山—十三陵	0.70	-0.46	48	土层—基岩	东北块	沉降改正
朝阳—十三陵	0.75	-0.48	44	土层—基岩	东北块	沉降改正
测绘院—十三陵	0.99	2.29	40	土层—基岩	东南块	
大兴—十三陵	1.04	0.56	60	土层—基岩	东南块	

3.5 面

三个或三个以上的 GNSS 测站可以组成面、体、场, 在“均匀假设”下, 可以用来计算主应变、剪应变、面应变、方向角、空间场等。本文选用房山、十三陵、蓟县三个基准站, 组成的三角形, 该三角形面积的时间序列可作为北京地区整体变化一种表示, 与其它前兆方法作简单的比较 (见图 4)。

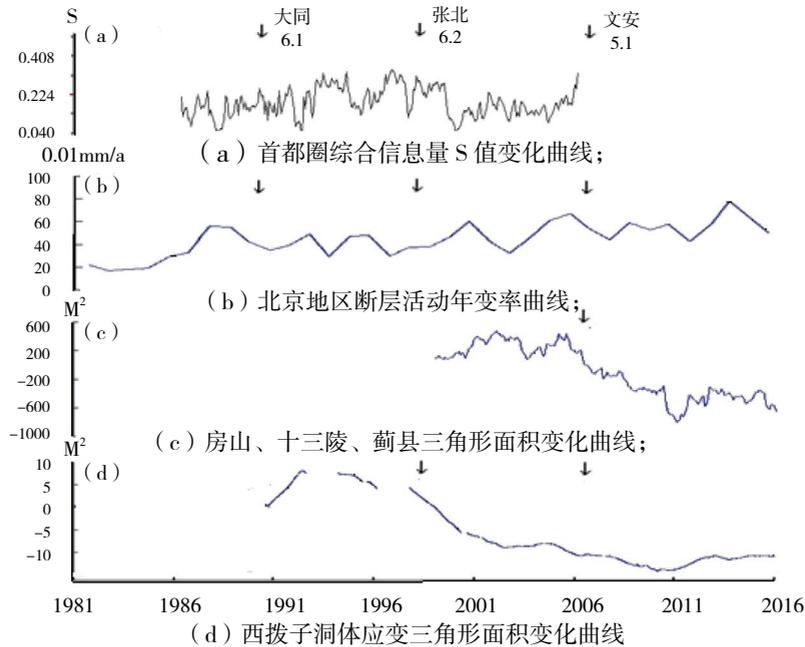


图 4 与北京地区地壳整体活动有关的几个参数的时序变化

Figure 4 Time-series changes of several parameters related to the overall crustal activity in Beijing

图 4 中，综合信息量 S 值的原理和计算方法见文献 [9]，图 4 (a) 是由首都圈约 70 个前兆测项算得 S 值（含形变、流体、电磁三大类测项），时段为 1986 年到 2006 年，曲线高值表示有异常的测项多、幅度大，S 值在高值期或高值期稍后为易发地震的时段。图 4 (b) 是首都圈跨断层测量年变率合成曲线，时段为 1981 年到 2015 年底，使用了水准和基线约 50 个测项（主要属北京地区的测项，跨度为百米量级），高值表示研究区域为张性活动为主，地震大体发生在高值期稍后的时段。图 4 (c) 是房山、十三陵、蓟县三个 GNSS 基准站组成的三角形面积变化曲线（边长数十公里，三角形面积约为 4259 平方公里，图中曲线值已减去常量），高值表示处于张性活动状态，时段 1999 年到 2015 年底，其间有一文安 5.1 级地震，也发生在高值期稍后时段。图 4 (d) 是西拨子洞体应变三测边组成的三角形面积变化曲线（边长 30-50 米，三角形面积约为 570 平方米），时段为 1991 年到 2015 年底，期间发生两次 5 级以上地震，高值表

示处于张性活动状态,张北 6.2 级地震发生在高值期稍后时段,文安 5.1 级震前异常不显著。考虑到上述两三角形的面积比约为 747 万比 1,图 4(d) 曲线更多的是反映局部信息,图 4(c) 曲线更多的反映北京地区整体信息。由图 4 中的 4 条曲线,可以推测,北京及邻区处于张性活动高值期稍后的时段是较大地震的易发期,如果 S 值出现偏高的现象则危险性更高,这种现象值得进一步研究。

4 结束语

在北京地区,利用 GNSS 连续观测台网进行地震监测,困难较多,主要困难是沉降干扰和地壳活动水平偏低。本文选择简单的计算方法进行可行性研究(不一定是最佳的),得到如下初步结果:(1)误差:选择适当解算方法和时段长度,一定程度上可以控制误差大小,舍去大误差测值也能得到一定的改善;(2)地表干扰因素:能识别和消除部分干扰,还需要内业和外业配合、不断的深入研究;(3)点:单测站坐标的变化能反映地壳运动,对大地震活动反映有待进一步研究;(4)线:两测站组成基线,使用线性回归的斜率表示基线的年变化率是可行的。采用块体假设,算得几十公里量级的南口-孙河活动断裂、黄庄-高丽营活动断裂的中期变化,与地质方法得到的长期变化结果具有可比性;(5)面:选择房山、十三陵、蓟县三个基准站组成三角形,计算其面积,作为北京及邻区整体活动的描述,与前兆综合信息 S 值(约 70 个测项合成)和跨断层测量年变率(约 50 个测项合成)比较,三者存在可比性,为北京及邻区地震预测增加一种新的方法。为了监测北京市的地壳运动,本文在 GNSS 应用的几个重要方面,给出了实现的方法和初步结果,完成了可行性研究,可望不久将来达到实用化的水平。

致谢

感谢顾国华研究员、张永仙研究员的悉心帮助和指导。

基金项目

中国地震局老专家科研基金(201520);中国地震局地震科技星火计划项目(XH18001Y);北京市自然科学基金项目(8041001,8092012)。

参考文献

- [1] 王伟, 王琪. GPS 观测约束下的中国大陆活动地块运动学模型 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28 (4): 75-82.
- [2] 黄立人. GPS 基准站时间序列的噪声特性分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26 (2): 31-33.
- [3] 田云峰, 沈正康. GPS 坐标时间序列中非构造噪声的剔除方法研究进展 [J]. 地震学报, 2009, 31 (1): 68-81.
- [4] 吴培稚, 孙建宝, 徐平, 等. 利用北京 GNSS 连续站监测地壳运动遇到的问题及解决办法 [J]. 地震, 2014, 34 (1): 144-151.
- [5] 吴培稚, 梁芳, 胡乐银, 等. 北京土层 GNSS 连续观测站沉降影响的识别和改正 [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36 (9): 789-792.
- [6] 王敏, 沈正康, 董大南. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正 [J]. 地球物理学报, 2005, 48 (5): 1045-1052.
- [7] 顾国华. 基准站 GPS 连续观测得到的垂直位移时间序列 [J]. 地震地质, 2005, 27 (2): 332-340.
- [8] 徐锡伟, 吴卫民, 张先康, 等. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 平建军, 张永仙, 张清荣, 等. 华北地区地震短期综合预测方法研究 [J]. 中国地震 2003, 19 (4): 416-424.