

Experimental Research on GNSS Time Series Generation for Seismic Monitoring in Beijing

Wu Peizhi Hu Leyin* Zhao Guiru Xu Ping Xing Chengqi
Ji Hong Chai Jinyi Liang Fang Shi Yufang

Beijing Earthquake Agency, Beijing

Abstract: Beijing GNSS continuous observation network has many factors that are not conducive to earthquake monitoring, such as a small coverage of the network, too many soil sites, low crustal movement level, and high noise level, etc. In this paper, mutation, continuous smoothness, shared noise, and station noise are used to decompose the time series of station locations. Based on the characteristic that continuous smooth changes can be linearly fitted, the short-term linear decomposition method is used to decompose noise and improve the signal-to-noise ratio. The test results show that when the window length is greater than 10 days, both the fitted value and the residual value can achieve good stability. Using the six-year data of Beijing GNSS Network, after the data preparation of detrending, de-mutation, and de-interference, the sliding linear decomposition is performed on the window for 12 days, and multiple time series such as common mode noise, self-noise, and fitting value are calculated. A preliminary analysis of these sequences shows the low-passivity of the linear decomposition method, the consistency of common mode noise, and the difference in the station's own noise. The results also show that the standard deviation

of the fitted sequence is reduced to two-thirds of the original sequence. The fitted value time series is the main object of earthquake monitoring research, and the organic combination of multiple time series can be decomposed to meet different needs.

Key words: GNSS; Noise Modeling; Linear decomposition; Low pass filtering; Earthquake monitoring

Received: 2020-08-27; Accepted: 2020-09-03; Published: 2020-09-22

北京 GNSS 地震监测用时间序列生成的试验研究

吴培稚 胡乐银* 赵桂儒 徐 平 邢成起
季 红 柴金翼 梁 芳 施玉芳

北京市地震局, 北京

邮箱: huleyin@bjseis.gov.cn

摘 要: 北京市 GNSS 连续观测台网范围小、土层站多、地壳运动水平低、噪声水平高, 不利于地震监测的因素较多。本文用突变、连续光滑、共有噪声、测站自身噪声来分解测站位置的时间序列。基于连续光滑变化可线性拟合的特点, 用短期线性分解法, 分解出噪声, 提高了信噪比。试验结果表明, 当窗长大于 10 日时, 拟合值和残差值都能取得很好的稳定性。用北京台网六年数据, 经去趋势、去突变、去干扰等数据准备后, 由窗长 12 日进行滑动短期线性分解, 算得共有噪声、自身噪声、拟合值等多种时间序列, 对这些序列的初步分析, 显示了短期线性分解法的低通性、共有噪声的一致性、测站自身噪声的差异性,

拟合值序列的标准差和幅差减小到分解前的三分之二左右。拟合值时间序列是地震监测研究的主要对象,分解得到多种时间序列的有机组合可满足不同需求。

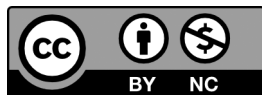
关键词: GNSS; 噪声; 短期线性分解; 低通滤波; 地震监测

收稿日期: 2020-08-27; 录用日期: 2020-09-03; 发表日期: 2020-09-22

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

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

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



1 引言

GAMIT 等软件解算得到的 GNSS 坐标时间序列中含有多种成分,不同的目的,时序分解的方法也不同。地震监测用的时间序列,需要排除设备维护更换、沉降干扰、长期飘移、年周变等,白噪声、闪烁噪声、游走噪声、共模噪声等 [1] [2] [3] [4] [5] 累积,最大可达到亚厘米级。这样的噪声水平,对于活动水平较低的北京地区 [6] [7],监测中长期变化有效,中短期变化存在困难。如能从坐标时间序列中消除噪声,使 GNSS 也能用于监测中短期变化,将是一个进步。文献 [4] 认为,共模噪声在 300 公里范围内是均匀的,它的存在掩盖了一些弱构造和瞬间构造的信号。文献 [5] 指出,测站综合中误差、共模中误差、自身中误差大小的统计比例为 1.6 : 1.3 : 1.0,提高信噪比,从测站坐标时间序列中消除影响较大的噪声,是一条切实可行的途径。2006 年至 2011 年的 6 年内,北京及周边地区的 GNSS 连续观测网络,有 16 个站,其中四分之三为土层站,干扰较多,台网站点密度 30 公里左右,站间距均小于 250 公里。本文利用这些观测数据,采用短期线性分解法,得到适用于地震监测的时间序列。

2 分解时间序列的一种算法

GAMIT 等软件解算得到的 GNSS 坐标的时间序列中含有多种成分,不同目的,时序分解的方法也不同。本文的目的是从时序中排除干扰、消除噪声,得到能用于地震监测的时间序列。设 GNSS 连续观测网的测站 $j=1, 2, \dots, m$, 共 m 个站,测站单分量时间序列的时间值 t_i 以年为单位,每日一值, $i=1, 2, \dots, n$, 共 n 日。测站 j 坐标分量的时序可用下式表示:

$$Y_j^A(t_i) = Y_j^{\text{趋}}(t_i) + Y_j^{\text{突}}(t_i) + Y_j^{\text{震}}(t_i) + Y_j^{\text{周}}(t_i) + Y_j^{\text{慢}}(t_i) + \Delta_j^{\text{共}}(t_i) + \Delta_j^{\text{自}}(t_i) \quad (1)$$

式中,为 Y^A 为坐标, $Y^{\text{趋}}$ 为趋势项, $Y^{\text{突}}$ 为突变项, $Y^{\text{震}}$ 为地震项, $Y^{\text{周}}$ 为周期项, $Y^{\text{慢}}$ 为慢变项,把噪声分为共有噪声 $\Delta^{\text{共}}$ 和测站自身噪声 $\Delta^{\text{自}}$ 两部分。突变项 $Y^{\text{突}}$ 的来源较多,如人为、设备、干扰、环境等。地震项 $Y^{\text{震}}$ 由震前、同震、震后三部分组成,同震变化可视为突变,震前震后可视为慢变。周期项 $Y^{\text{周}}$ 主要由半年周期、年周期等慢变化组成。把 $Y^{\text{慢}}$ 、 $Y^{\text{周}}$ 和地震慢变合并为 $Y^{\text{连}}$, $Y^{\text{连}}$ 时间上为连续光滑的慢变化。沉降干扰也可分解为突变、慢变、趋势三部分。经上述归类, Y^A 消除突变 $Y^{\text{突}}$ 后得 Y^B :

$$Y_j^B(t_i) = Y_j^{\text{趋}}(t_i) + Y_j^{\text{连}}(t_i) + \Delta_j^{\text{共}}(t_i) + \Delta_j^{\text{自}}(t_i) \quad (2)$$

趋势项 $Y^{\text{趋}}$ 本质上属于连续光滑变化,趋势的存在不利于短期线性分解,需事先消除, Y^B 消除趋势项 $Y^{\text{趋}}$ 后得 Y^C :

$$Y_j^C(t_i) = Y_j^{\text{连}}(t_i) + \Delta_j^{\text{共}}(t_i) + \Delta_j^{\text{自}}(t_i) \quad (3)$$

$Y^{\text{连}}$ 为连续光滑的慢变化,我们总可以假设 $Y^{\text{连}}$ 的短期变化是线性的。本文通过试验的方法,找到“短期”最佳长度,对 Y^C 施于短期线性分解,得拟合项 $Y^{\text{连}}$ 和残差项 Y^D :

$$Y_j^D(t_i) = \Delta_j^{\text{共}}(t_i) + \Delta_j^{\text{自}}(t_i) \quad (4)$$

噪声时间序列 $Y_j^D(t_i)$ 的标准差用 σ_j 表示。北京 GNSS 连续观测台网站间距小于 250 公里,在同一时刻 t_i , 网内所有测站同分量的共有噪声可视为相同[4]。当测站数 m 足够大,时刻 t_i 所有测站自身噪声(可视为白噪声)之和趋于零[5]。为了避免测站自身噪声差异的影响,取 j 测站标准差 σ_j 为权系数的分母,第一个测站的标准误差 σ_1 为权系数的分子。在时刻 t_i , 对式(4)等号两边先加权,

再 1 到 m 求和得:

$$\sum_{j=1}^m \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_j} \times Y_j^D(t_i) \right] = \sum_{j=1}^m \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_j} \times \Delta_j^{\text{共}}(t_i) \right] + \sum_{j=1}^m \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_j} \times \Delta_j^{\text{自}}(t_i) \right] \quad (5)$$

其中 $\Delta^{\text{共}}(t_i) = \Delta_j^{\text{共}}(t_i)$, $\sum_{j=1}^m \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_j} \times \Delta_j^{\text{自}}(t_i) \right] \approx 0$ 。

$$\Delta^{\text{共}}(t_i) \approx \frac{\sum_{j=1}^m \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_j} \times Y_j^D(t_i) \right]}{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_j} \right)} \quad (6)$$

由式 (6) 算得时刻 t_i 的共有噪声 $\Delta^{\text{共}}(t_i)$, 式 (5) 右边第二项趋于零的条件是测站数足够大, 测站总数不够大时用近似号。

经上述分解, 我们得到了一系列时间序列, 其中突变项 $Y^{\text{突}}$ 、拟合项 $Y^{\text{连}}$ 、共有噪声 $\Delta^{\text{共}}$ 和测站自身噪声 $\Delta^{\text{自}}$ 与地震监测密切, 趋势项 $Y^{\text{趋}}$ 含有背景信息, 如在全球框架下研究测站的连续变化, 必须 $Y^{\text{趋}}$ 和 $Y^{\text{连}}$ 组合使用。

3 试验研究

3.1 数据准备

通常测站坐标需作必要数据准备才能用于计算。为了能从坐标分量时序中分解出拟合项和噪声, 需事先消除趋势、突变、干扰等 [8] [9]。数据准备处理方法一般有去粗差、去阶跃、去趋势、去突变、去干扰、去孤立值 [1]、插值、去线性等。显然, 具体到某测站某测项, 需根据实际情况和需求, 选用合理方法和参数。

3.2 时间序列线性分解的可行性

数据准备完成后的时间序列可用式 (3) 表示。采用滑动短期线性分解法, 把 Y^C 分解成拟合值 $Y^{\text{连}}$ 、残差值 Y^D 两部分。滑动计算的步长选为一日, 取窗长 3 日至 60 日, 通过试验确定最佳窗长, 拟合值、残差值的离散度 (标准误差) 作为判断参数, 得全网所有测站三个分量的离散度曲线 (图 1)。不难看出, 各测站各分量离散度曲线形态相似, 残差值离散度随窗长加大而增大, 当窗长大

于 10 日, 离散度趋于平稳; 拟合值离散度随窗长加大而减小, 当窗长大于 10 日, 离散度趋于平稳。离散度曲线不重合表明各测站存在差异。窗长 10 日左右, 北京地区地壳活动是线性的假设, 合理可行 (突变已排除)。

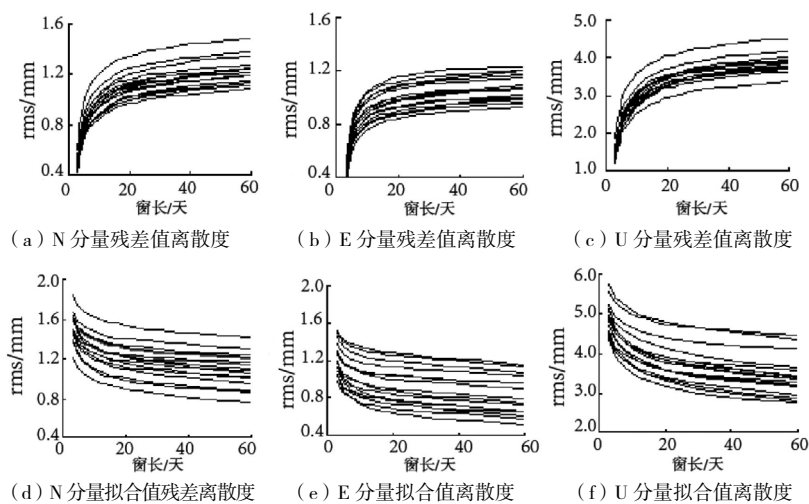


图 1 残差值和拟合值的离散度与窗长的关系

Figure 1 The relationship between the residual value and the dispersion of the fitted value and the window length

3.3 噪声的估计与比较

权衡窗长大小对稳定性影响与地震监测灵敏度的关系, 取窗长 12 日为最佳值, 窗长 15 日为检验值, 用滑动短期线性分解法, 算得网内各站三分量的噪声序列 Y_j^D , 再用式 (5)、式 (6) 估计全网共有噪声 $\Delta^{\text{共}}$ 。图 2(a)、(b)、(c) 是窗长为 12 日的共有噪声, 表 1 给出几种噪声时间序列平均值、标准差及其付氏谱第一个优势周期。共有噪声的平均值均为 0.0 毫米, 共有噪声前十个优势周期不大于 12 日, 水平分量标准差 0.7 毫米左右, 垂直分量标准差 2 毫米左右, 目视共有噪声的包络线, 水平分量夏季大冬季小, 垂直分量季节变化不明显。

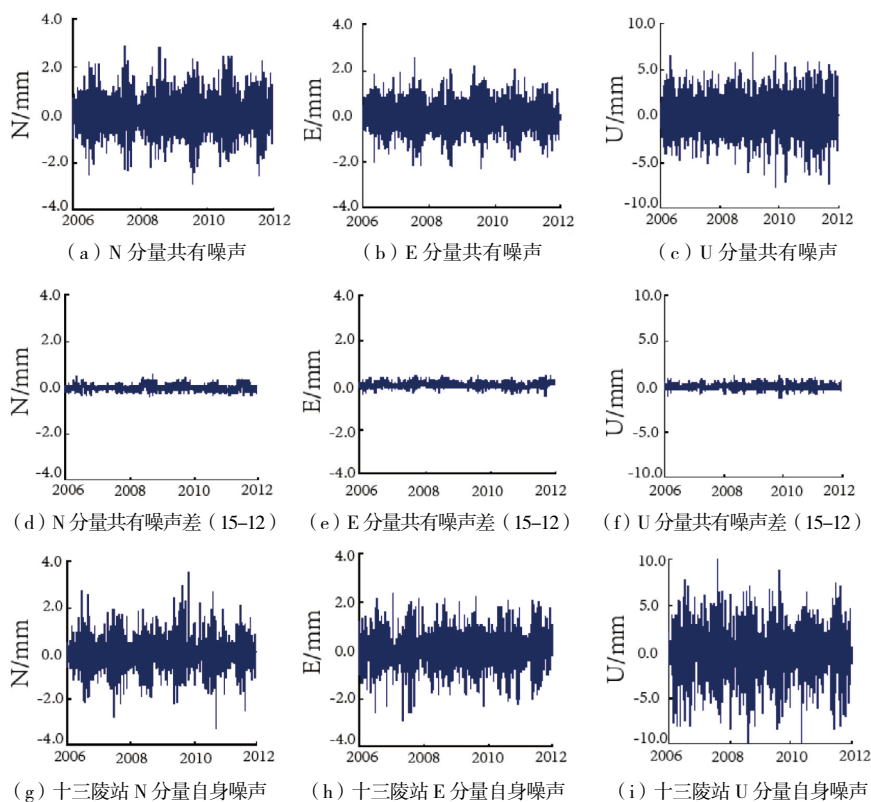


图 2 共有噪声与十三陵站自身噪声的时间序列

Figure 2 Time series of shared noise and the noise of the BJSH station

比较不同窗长共有噪声的差值, 是最为严格一致性检验, 图 2(d)、(e)、(f) 是窗长 15 日共有噪声减去窗长 12 日共有噪声的差值。差值序列的平均值均为 0.0 毫米, 水平分量标准差 0.1 毫米左右, 垂直分量标准差 0.3 毫米左右, 远小于共有噪声本身, 优势周期均大于共有噪声的优势周期。窗长 12 日和 15 日共有噪声的差异很小, 一致性好。

测站自身噪声取决于测站环境, 全网最小自身噪声水平略低于共有噪声, 优势周期小于共有噪声; 全网最大自身噪声水平高于共有噪声, 优势周期也小于共有噪声。图 2(g)、(h)、(i) 是十三陵站的自身噪声。它们的平均值均为 0.0 毫米, 前十个优势周期不大于 12 日, 目视自身噪声时间序列的包络线夏季大冬季小。

表 1 噪声时间序列相关参数比较表

Table 1 Comparison table of related parameters of noise time series

分量	N 分量			E 分量			U 分量		
项目	平均值 (mm)	标准差 (mm)	第 1 周 期(日)	平均值 (mm)	标准差 (mm)	第 1 周 期(日)	平均值 (mm)	标准差 (mm)	第 1 周 期(日)
共模噪声(12 日窗长)	0.00	0.73	9.8	0.00	0.61	3.4	0.00	1.98	8.3
共模噪声(15 日窗长)	0.00	0.73	9.8	0.00	0.65	3.4	0.00	2.11	8.3
共模噪声差(15—12)	0.00	0.13	341	0.00	0.12	1024	0.00	0.33	12.9
自身噪声(最大)	0.00	0.77	4.8	0.00	0.81	2.1	0.00	3.01	2.1
自身噪声(最小)	0.00	0.62	3.6	0.00	0.58	2.5	0.00	1.93	3.0

3.4 地震监测用的时间序列

本文算法可产生一系列不同性质的时间序列,与地震监测关系密切的有突变序列可由计算取得,突变数量不多,含有同震信息较易识别。远场地震的高频和脉冲异常可能含在共有噪声序列中,概率很小。网内地震的高频和脉冲异常,可能含在各测站自身噪声序列中,概率很小。拟合值时间序列是地震监测重点需要研究的部分。趋势和干扰序列是地震监测的辅助部分。

比较短期线性分解前后时间序列的异同,有利于进一步了解分解过程中信息的取舍。十三陵站噪声分解前后时间序列有关参数比较见表 2,表中同分量的平均值相同,前 5 个优势周期相同,均为半年以上的长周期成分,噪声分解后时序的标准差、幅差是分解前三分之二左右。图 3(d)是噪声分解前的时间序列,图 3(e)是噪声分解后的拟合值时间序列,不难看出,拟合值曲线的高频成分、波动幅度均大大减少。可以粗略认为,短期线性分解具有低通滤波性质,它过滤了短周期部分,使得拟合序列在中短期部变得“干静”,精度得以提高。

表 2 噪声分解前后时间序列参数比较表

Table 2 Comparison table of time series parameters before and after noise decomposition

分量	N 分量		E 分量		U 分量	
项目	噪声分解前	噪声分解后	噪声分解前	噪声分解后	噪声分解前	噪声分解后
平均值(mm)	-0.21	-0.21	0.00	-0.01	-0.23	-0.23
标准差(mm)	1.59	1.23	1.22	0.79	4.87	3.40
最大值(mm)	4.80	3.38	3.79	2.39	14.40	8.73

续表

分量	N 分量		E 分量		U 分量	
项目	噪声分解前	噪声分解后	噪声分解前	噪声分解后	噪声分解前	噪声分解后
最小值 (mm)	-5.17	-3.37	-3.69	-2.49	-13.74	-10.00
第 1 周期 (日)	1365	1365	1024	1024	341	341
第 2 周期 (日)	341	341	512	512	585	585
第 3 周期 (日)	256	256	341	341	410	410
第 4 周期 (日)	293	293	164	164	1365	1365
第 5 周期 (日)	585	585	410	410	273	273

地震监测中, 时空演化分析是一种常用的方法。时空演化为多测站多测项计算, 各单测项时间序列的可比性是最基本要求。单测项各时间序列的组合可实现可比性。如图 3 (f)、(g)、(h), 即在拟合值时间序基础上, 组合了线性恢复、同震恢复、趋势恢复, 就得到可用于全球框架下的时间序列。比较图 3 (g) 与图 3 (b), 显然, 噪声分解后的时序曲线更专业。

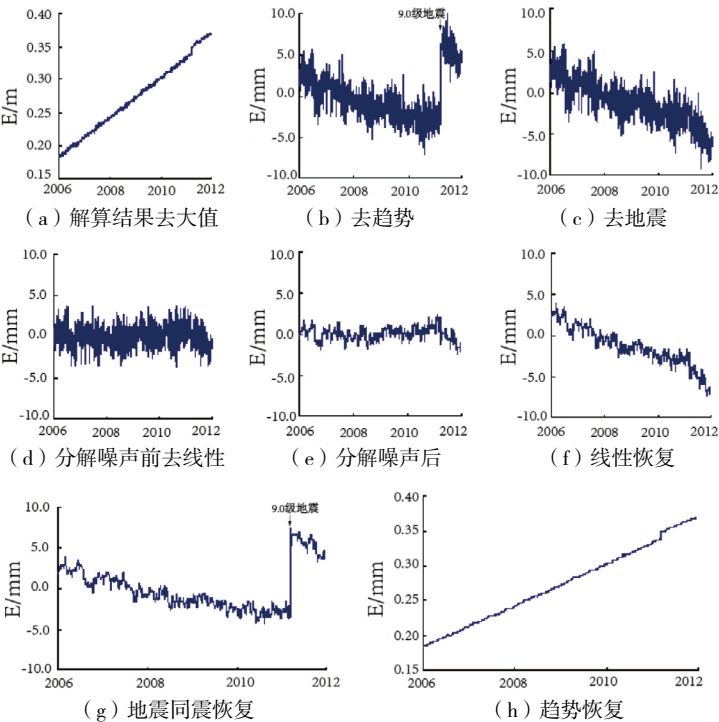


图 3 十三陵站 E 分量的数据准备、噪声分解、恢复

Figure 3 Data preparation, noise decomposition and restoration of E component of the BJSH Station

4 结语

本文利用北京地区 GNSS 连续观测台网数据,生成地震监测实用化时间序列为目标,对 48 个测项的时间序列,分别进行了数据准备、噪声短期线性分离和时序组合。初步认为:(1)测站坐标时序含有多种成分,可归纳为突变、连续光滑慢变、共有噪声和自身噪声四大类。理论上,这四类序列中都含有地震信息,主要研究对象是连续光滑慢变时序。(2)短期线性分解法,需事先对原始坐标序列进行去趋势、去干扰、去突变、去孤立值、去线性等数据准备处理。(3)滑动线性分解可行性试验结果表明,当窗长大于 10 日时,能得到一致性好的计算结果。(4)北京台网的共有噪声可视为同日相同,优势周期小于 10 日,水平分量标准差 0.7 毫米左右,垂直分量标准差 2.1 毫米左右。(5)测站自身噪声源于测站本身,测站间存在差异,当测站数量足够多时,全网各站同日自身噪声和趋于零;测站自身噪声的优势周期小于 10 日,标准差、优势周期与共有噪声存在差异。(6)短期线性分解具有低通滤波性质,短周期成分被滤波,长周期成分不变,噪声分解后拟合值时序的标准差、幅差均为分解前三分之二左右。(7)本文产生的多种时间序列具有不同用途,如沉降干扰序列用于沉降分析,趋势序列用于大区域分析,共有噪声序列用于临时野外 GPS 测量,拟合值时间序列与其它时间序列组合可满足不同的需求。本文是在北京连续观测台网的条件下,采用短期线性分解法,得到测站坐标多个不同性质的时间序列,为本地区进一步利用 GNSS 监测地震提供了可能。

致谢

感谢顾国华研究员、王敏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(201816);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] 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.
- [2] 黄立人, 符养. GPS 连续观测站的噪声分析 [J]. 地震学报, 2007, 29 (2): 197–202.
- [3] 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.
<https://doi.org/10.2174/138955705774575237>
- [4] 田云锋, 沈正康. GPS 观测网络中共模分量的相关加权叠加滤波 [J]. 地震学报, 2011, 33 (2): 198–208.
- [5] 杨博, 张风霜, 韩玉萍. GPS 连续站垂直位置时间序列共模误差的识别与估计 [J]. 测绘科学, 2011, 36 (2): 41–44.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.