

# 天山地区 GPS 连续站高程时间序列分析<sup>\* 1</sup>

刘开宇<sup>1)</sup> 王 琪<sup>2)</sup>

(1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071  
(2) 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院行星科学研究所,武汉 430074)

**摘 要** 利用 UNAVCO 提供的天山地区境内外 GPS 连续站的观测数据,处理得到各站高程时间序列。进行最小二乘线性拟合,提取速度场,并消除原始序列的线性趋势。然后对时间序列进行谱分析以及小波多分辨率分析。可以看出,天山地区在过去 10 余年间呈现整体隆升趋势,各个观测站之间抬升的一致性较好,并且各站都表现出明显的季节性变化。

**关键词** GPS;天山地区;高程时间序列;功率谱密度;小波分析

**中图分类号**:P228.4

**文献标识码**:A

## HEIGHT TIME SERIES ANALYSIS OF CONTINUOUS GPS IN TIANSHAN REGION

Liu Kaiyu<sup>1)</sup> and Wang Qi<sup>2)</sup>

(1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071  
(2) Institute of Planetary, College of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract** This paper uses continuous GPS observation data provided by UNAVCO to get height time series of each site, and extractes velocity field by least-square linear fit and eliminates the linear trend of the original series. Then we take spectral analysis and wavelet multi-resolution analysis of time series. It can be seen that in the past ten years the Tianshan region shows overall uplift trend and has a good agreement between the various stations. Each station shows significant seasonal changes.

**Key words**:GPS; Tianshan region; height time series; power spectral density; wavelet analysis

## 1 引言

天山地区的构造活动一直是地震研究者关注的热点地区之一。虽然 GPS 三维坐标时间序列噪声高程方向比水平方向大,单天解算的精度不高,利用短期的观测资料监测 2~3 mm 的垂直形变几乎是不可能的<sup>[1]</sup>。但是研究表明,累积多年的 GPS 数据在高程方向的精度将有明显提高,利用连续观测站

每日解算的高程方向的坐标可以进行多方面的研究,例如该地区的大陆板块垂直运动,该地区季节性的运动趋势等。

本文利用天山地区 11 个 GPS 连续站累积多年的数据,进行时间序列分析,研究高程方向的变化,并进一步探讨地壳垂直形变的问题。由于篇幅的限制,文中仅给出 3 个具有代表性测站(CHUM、KMTR、KRTV 站)的处理结果。

\* 收稿日期:2013-05-02

基金项目:国家自然科学基金(41274027,41274037)

作者简介:刘开宇,男,1988 年生,硕士研究生,主要研究 GPS 数据处理分析. E-mail: lkygps@gmail.com

通讯作者:王琪,博士,教授, E-mail: wangqi@cug.edu.cn

## 2 数据预处理

本研究数据来源于美国的 UNAVCO (<http://www.unavco.org>), 本文选择了其中 11 个数据连续性较好, 缺值较少的站点进行处理。对于部分缺值情况严重的时间段予以剔除。图 1 为站点分布, 表 1 为各站资料的概况。

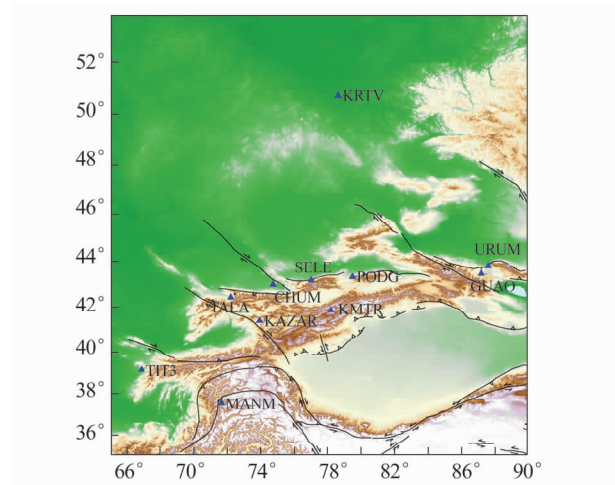


图 1 站点分布  
Fig. 1 Distribution of sites

表 1 测站数据概况

Tab. 1 Data summary of sites					
测站代码	点名	经度 (°)	纬度 (°)	时间段 (年)	观测总量
CHUM	Chumysh	74. 75	43. 00	2001—2011	3 603
GUAO	GUAO	87. 18	43. 47	2004—2011	2 367
KAZA	Kazarman	73. 94	41. 38	2001—2008	2 771
KIT3	Kitab	66. 89	39. 14	2003—2011	2 930
KMTR	Kumtor-2	78. 20	41. 87	2001—2009	3 131
KRTV	Kurchator	78. 62	50. 71	2001—2011	3 199
MANM	Manem	71. 68	37. 54	2008—2011	1 430
PODG	PODG	79. 48	43. 33	2001—2008	2 630
SELE	Selezaschita	77. 02	43. 18	2001—2008	2 589
TALA	Talas	72. 21	42. 45	2001—2011	3 940
URUM	Urumqi	87. 60	43. 18	2001—2008	2 446

观测数据通过 Bernese 软件解算, 得到垂直向的坐标时间序列如图 2 所示, 其中图 2 (a)、(b)、(c) 分别为 CHUM、KMTR、KRTV 站的原始高程坐标时间序列图。

在图 1 中可以看到, KRTV 站位于哈萨克斯坦境内东北角, 不属于天山地区, 其时间序列可以作为参考。而从预处理得到的原始时间序列可以看出, KRTV 站的上升趋势不明显, 其他位于天山地区的 10 个测站均呈明显上升趋势。

## 3 提取线性趋势

站坐标时间序列按式 (1) 进行线性拟合, 生成

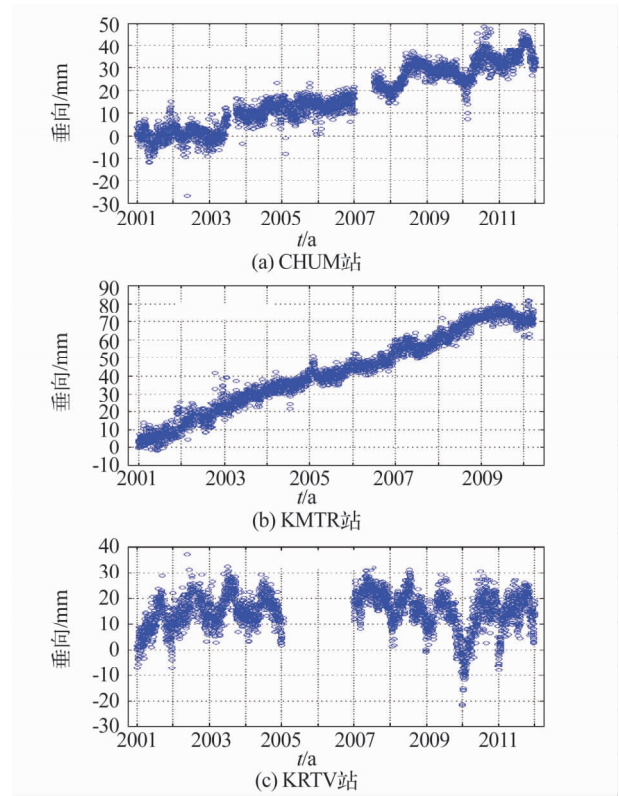


图 2 CHUM、KMTR、KRTV 站原始垂向坐标时间序列  
Fig. 2 Original height time series of CHUM, KMTR and KRTV stations

零均值, 没有线性趋势项的坐标时间序列<sup>[2]</sup>。

$$S_{dt} = S - (a + bt) \tag{1}$$

式中  $S$  为原始时间序列,  $S_{dt}$  为消除常数项和线性项后的残差时间序列,  $a$  和  $b$  是时间序列  $S$  的最小二乘线性拟合参数, 其中  $b$  是线性变化速度。

图 3 为去除线性趋势后的残差时间序列, 图 4 为 CHUM、KMTR、KRTV 站对应的线性速度。

## 4 Welth 法计算功率谱

噪声功率谱  $P(f)$  与噪声频率  $f$  之间的函数关系是进行噪声分析的根据。GPS 测站坐标时间序列功率密度谱  $P(f)$  与其频率存在幂次关系<sup>[3]</sup>:

$$P(f) \propto (f)^k \tag{2}$$

函数中的指数  $k$  即为谱指数, 据此确定噪声类型。在双对数坐标系中谱指数  $k$  即为该函数图像的直线斜率:

$$P(f) = 10 \log_{10} (2P_z(f)/f_z) \tag{3}$$

$$K = P(f)/10 \log_{10} f \tag{4}$$

式中,  $f_z$  为采样率, 通常为  $1/\text{day} = 1.157\ 4 \times 10^{-5}$  Hz;  $P_z(f)$  为通过 Welth 法求得的功率谱。利用最小二乘线性拟合该斜率  $k$ , 在图中以红色直线标出。图 5 (a)、(b)、(c) 分别为 CHUM、KMTR、KRTV 站的拟合结果。

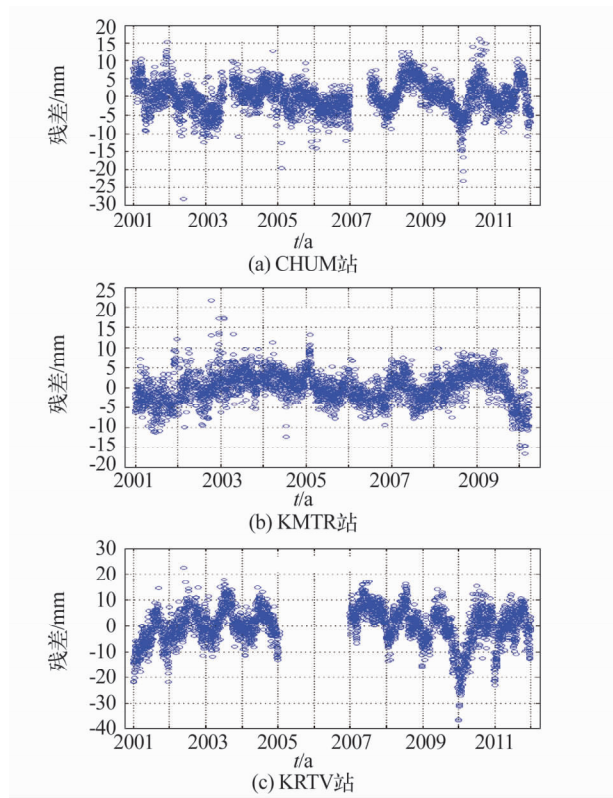


图3 去除线性趋势后的时间序列  
Fig.3 Time series after removing linear trend

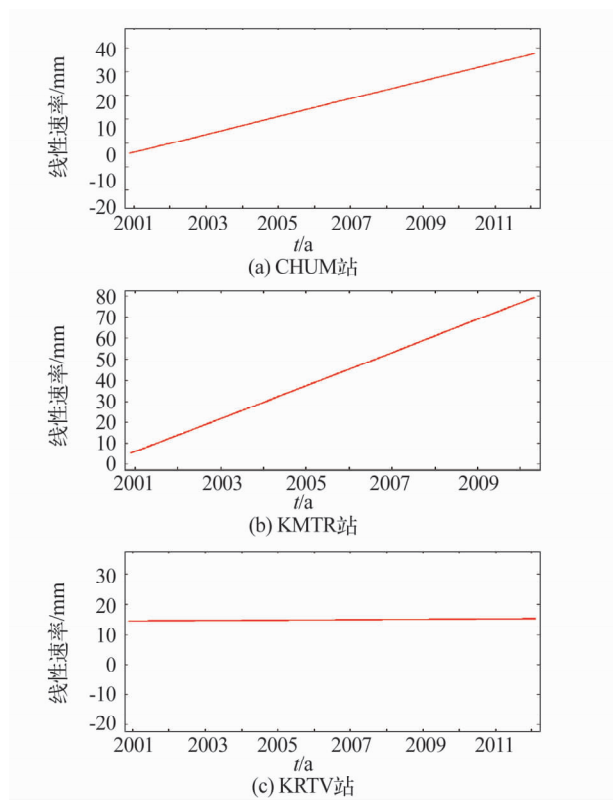


图4 线性速率  
Fig.4 Linear velocity

若谱指数处于  $-1.0 \sim 0.0$  之间,采用白噪声 + 闪烁噪声的模型;若谱指数小于  $-1.0$ ,则采用白噪声

+ 闪烁噪声 + 随机漫步噪声的模型,进行各噪声分量的估计<sup>[4]</sup>。从表2中可以看出,大部分(8个)测站的谱指数小于  $-1.0$ ,只有3个站的谱指数处于  $-1.0 \sim 0.0$  之间。各站的谱指数大小显示出较强的一致性,推测这是由于各个测站之间地理距离相对较近,各方面环境类似引起的。同时,根据文献[3]的研究,随着纬度的升高,谱指数(绝对值)也升高,本文中大部分测站的谱指数结果都能与之相符。例如纬度最高的KRTV站的谱指数达到  $-1.293 \pm 0.034$ ,而纬度相对较低的MANM站的谱指数为  $-0.521 \pm 0.033$ 。

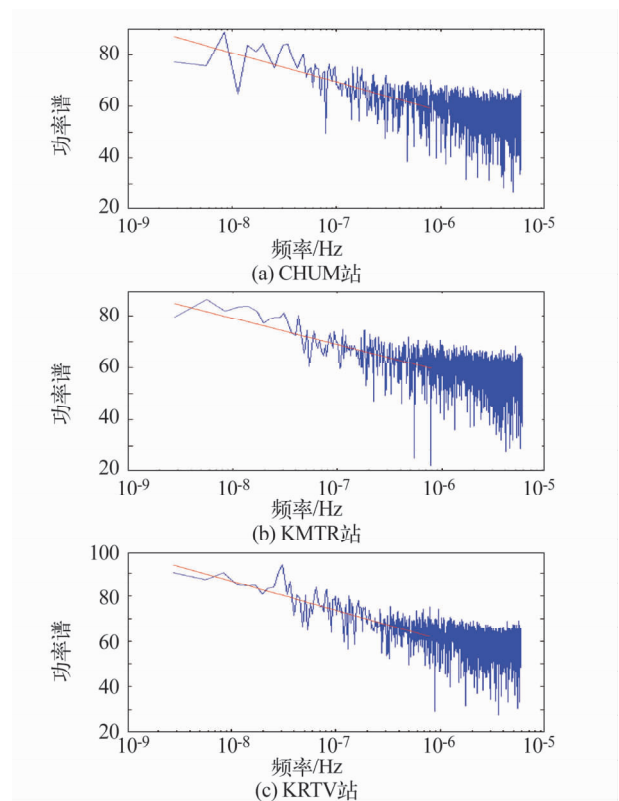


图5 CHUM、KMTR、KRTV 站功率谱  
Fig.5 Power spectral density of CHUM , KMTR and KRTV stations

表2 各测站谱指数统计  
Tab.2 Spectral index statistics of sites

测站代码	谱指数
CHUM	$-1.133 \pm 0.059$
GUAO	$-1.157 \pm 0.045$
KAZA	$-1.006 \pm 0.036$
KIT3	$-1.024 \pm 0.029$
KMTR	$-1.021 \pm 0.058$
KRTV	$-1.293 \pm 0.034$
MANM	$-0.521 \pm 0.033$
PODG	$-0.539 \pm 0.021$
SELE	$-0.688 \pm 0.025$
TALA	$-1.045 \pm 0.032$
URUM	$-1.525 \pm 0.043$

5 小波多分辨率分析

谱分析方法可以分析有色噪声的特性,但只能在频域的角度来讨论问题。站坐标时间序列存在的周年和半周年的周期特性,是由于各种地球物理因素的共同影响。这些地球物理因素在不同的年份有不同的影响,在部分时段内还可能存在奇异变化。为了精细分析这些变化特征,有必要利用小波变换在时频域内来进行分析<sup>[5]</sup>。

小波多分辨率分析可对 GPS 高程时间序列的周年项和半年项分解,它相当于一个周年数学滤波器和半年数学滤波器。采用 *coiflets* 小波滤波器对 11 个观测站进行分析。观测站周年和半周年的振幅以及最大值出现的月份如表 3 所示。图 6 ~ 8 分别表示 CHUM、KMTR、KRTV 站小波分析的结果。

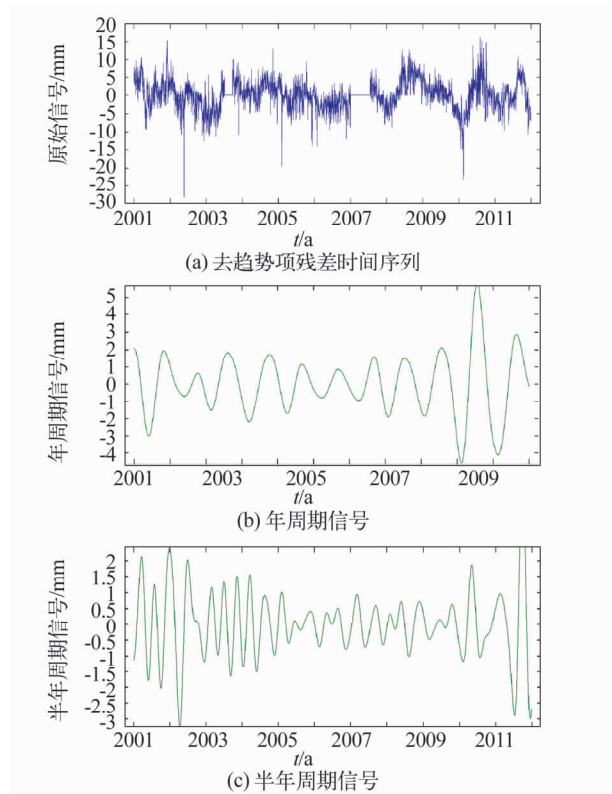


图 6 CHUM 站小波分析结果  
Fig. 6 Wavelet analysis of CHUM station

通过分析连续跟踪站的高程时间序列,发现大多数台站存在季节性变化与年周期变化。季节性变化的原因是复杂的。一般来说,季节性变化的潜在影响因素可分为三类:1) 第一类主要是引力摄动引起的,主要来自于日月。地极的移动引起的坐标旋转位移,极移引起的世界时改正,固体潮、海洋潮汐以及大气引起的荷载,都属于这一类;2) 第二类季节性变化是流体引起的。大气压的季节性变化、非

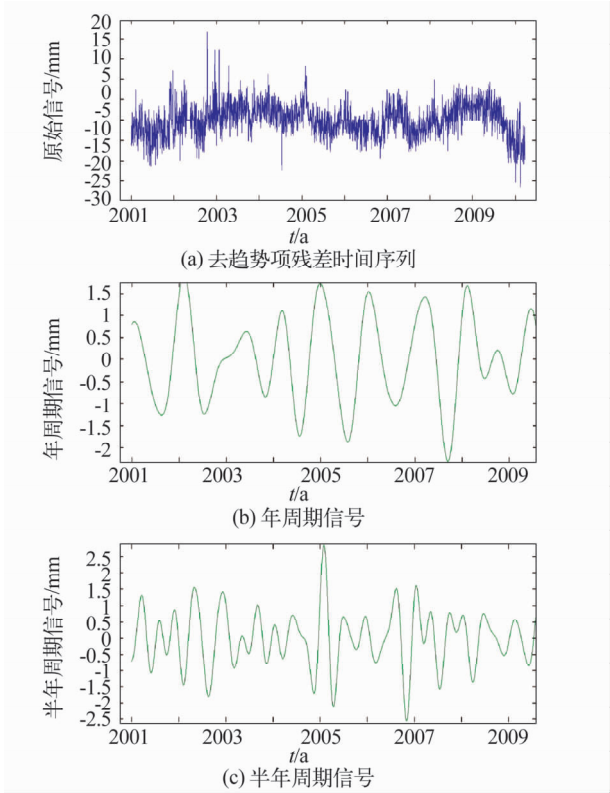


图 7 KMTR 站小波分析结果  
Fig. 7 Wavelet analysis of KMTR station

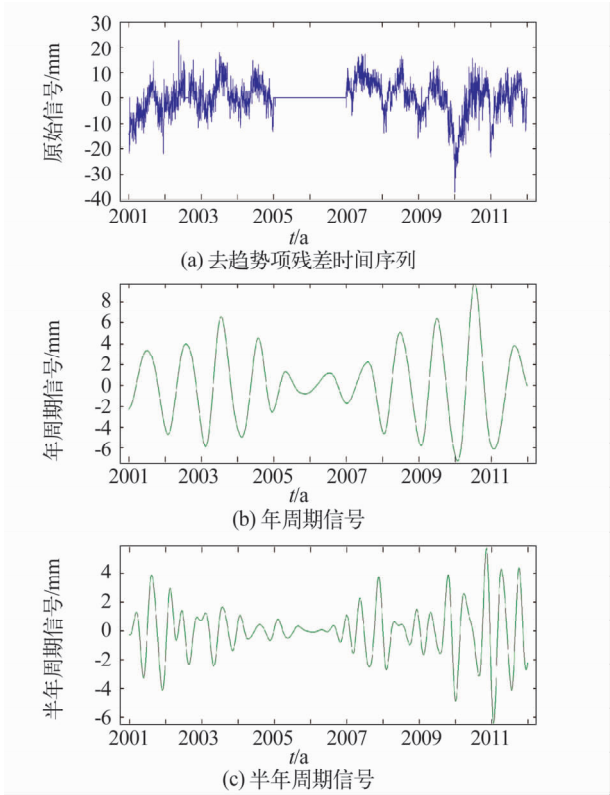


图 8 KRTV 站小波分析结果  
Fig. 8 Wavelet analysis of KRTV station

潮汐海平面的波动、地下水都属于此类。另外,台站下基岩的热膨胀、风剪力也属此类;3) 第三类是存



在季节性变化的各种误差,卫星轨道模型、电离层模型、对流层模型、相位中心的变化、多路径效应等都会对坐标位置计算产生明显的影响。

表 3 观测站小波分析结果  
Tab.3 Wavelet analysis of sites

测站 代码	年周期振 幅(mm)	最大值出 现的月份	半年周期 振幅(mm)	最大值出 现的月份
CHUM	4.3±0.5	9-11	2.1±0.7	3-5,7-9
GUAO	4.9±0.3	2-4	3.8±0.6	1-3,6-8
KAZA	8.2±1.1	7-9	±6.3±0.9	3-5,8-10
KIT3	4.7±0.7	1-3	3.2±0.5	3-5,10-12
KMTR	2.6±0.4	1-3	3.1±0.9	2-4,7-9
KRTV	9.8±1.2	5-7	7.9±0.7	1-3,7-9
MANM	3.3±0.3	11-1	4.9±0.8	1-3,8-10
PODG	1.3±0.6	5-7	4.3±0.8	11-1,7-9
SELE	1.8±0.9	9-11	2.4±1.0	2-4,10-12
TALA	3.8±1.2	9-11	3.5±0.7	2-4,8-10
URUM	8.9±0.9	5-7	7.6±1.2	2-4,9-11

6 结论

通过以上的分析和讨论,可以得出以下结论:

1)天山地区的垂向运动近些年来是以抬起隆升为主,在线性运动趋势方面,处理的上述观测站的

结果有比较好的一致性。其中位于天山地区以外作为参考的 KRTV 站则没有呈现出这种趋势。

2)对于该地区的上述观测站,应采用白噪声+闪烁噪声+随机漫步噪声的模型,对各噪声分量进行估计。

3)通过对时间序列的小波多分辨率分析,可以看出几乎所有观测站的高程序列都存在季节性变化。

参 考 文 献

1 杨强. 基于 IGS 连续跟踪站的地壳垂直形变时间序列分析[D]. 山东科技大学,2007.

2 熊福文,等. 长江三角洲地区地形变特征的 GPS 监测和分析[J]. 地球物理学报,2007,50(6):1 720-1 722.

3 赵忠海. GPS 连续站坐标时间序列噪声分析[D]. 中国地震局地震研究所,2010.

4 黄立人,等. GPS 连续观测站的噪声分析[J]. 地震学报,2007,29(2):197-200.

5 张鹏,等. 我国 GPS 跟踪站数据处理与时间序列特征分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,32(3):252-253.

6 杨强. 基于 IGS 连续跟踪站的 GPS 高程时间序列分析[J]. 测绘科学,2007,32(3):55-56.

(上接第 146 页)

参 考 文 献

1 丁鉴海,卢振业,黄雪香. 地震地磁学[M]. 地震出版社,1994.

2 任熙宪,祁贵仲,詹志佳. 唐山地震前后北京地区地磁场总强度的变化[J]. 地震学报,1984,6(3):271-286.

3 姚法章. 地磁总强度资料在地震预报中的应用[J]. 西北地震学报,1984,6(3):44-48.

4 林云芳,等. 地磁方法在地震预报中的应用[J]. 地震地磁观测与研究,1999,20(6):35-44.

5 蒋延林,王建宇,赵卫红. 盐城台-杭州台地磁幅相法临震异常标志体系[J]. 地震学刊,2000,20(1):45-48.

6 冯志生,等. 地磁垂直分量日变幅逐日比及其与地震关系的探讨[J]. 华南地震,2001,21(2):20-27.

7 曾小苹,等. 地球磁场对太阳风的加卸载响应与地震[J]. 地震地磁观测与研究,1996,17(1):49-52.

8 丁鉴海,余素荣,肖武军. 地磁“低点位移”现象与昆仑

山口西 8.1 级地震[J]. 西北地震学报,2003,25(1):16-21.

9 吴小平. 2003. 利用地磁低点位移预测发震时间[J]. 四川地震,2003,1:33-36.

10 李琪,王建军,杨冬梅. 文安地震前后的转换函数参数变化分析[J]. 地震地磁观测与研究,2008,29(3):35-40.

11 冯志生,等. 中强震前地磁谐波振幅比的趋势性变化特征步研究[J]. 西北地震学报,2004,26(1):50-56.

12 汪江田,顾学章,龚耀. 从岩石的应变、破裂与电性的变化关系探索对地震的预报[J]. 地震学刊,2000,20(3):1-8.

13 郑在壮,沈瑞童. 地磁短周期转换函数在地震预报中的应用[J]. 地震地磁观测与研究,2010,31(3):13-17.

14 周琼,曹志磊,夏仕安. 安徽地区地磁转换函数变化与地震的关系[J]. 地震地磁观测与研究,2011,32(5):55-59.