



分段回归在剔除精河、库尔勒水平摆气象因素影响的探索^①

邢喜民, 张 涛

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:以精河、库尔勒水平摆观测数据为因变量,以地温、气温、气压为自变量进行分段回归分析,结果如下:(1)地温和气温是影响精河、库尔勒水平摆观测数据年频段信息的主要因素,它们之间具有准线性关系;(2)去掉趋势后,观测数据与地温、气温、气压之间的线性相关性明显增强,说明观测数据的趋势转折变化不是气象因素造成的,可能是观测区域的构造应力变化所致;(3)研究表明分段回归是全样本回归分析方法的一种改进,是降低时间序列数据处理难度的有效方法。

关键词:分段回归;水平摆;相关系数;回归方程

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0623-006

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0623

Subsection Regression Method for Removing Meteorological Factors in the Jinghe, Korla Horizontal Pendulum

XING Xi-min, ZHANG Tao

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Crustal deformation observation stations built near the surface cannot avoid distractions that include information from the Earth's interior and exterior. Identifying earthquake precursors and other distraction factors is currently difficult. The regression method is a mathematical model for quantitatively deducting distraction factors. However, a mathematical model cannot describe the change in tendency during different stages when building a regression model. Subsection regression was used to divide data into sections to assist in the use of a mathematical model to conduct regression analysis. The dividing point of the regression model was the turning point for the change in tendency of deformation data. The selection of this dividing point can influence model quality. This study used ground tilt observation data from horizontal pendulums at the Jinghe and Korla stations as the dependent variable and meteorological factors as the independent variable. The tendency change of deformation data was divided into several parts and correlation coefficients were calculated. Scatter diagrams were created to test the results with the model. The results indicated that air and ground temperature were the main distractions for the fixed-point deformation of the horizontal pendulums at the Jinghe and Korla stations. The relationship between meteorological factors and deformation data strengthened existing knowledge regarding deformation observations. The linear correlation of meteorological factors and deformation data was strengthened after deducting the change in tendency. Therefore, the change in tendency may have been caused by regional stress changes according to the study on deformation data from the Sichuan-Yunnan rhombic block and the anomalies observed before the Xinyuan, Hejing earthquake of $M_s 6.6$ in Xinjiang by Sun Yi and Wang Zai-hua. Subsection regression may be the most efficient method to reduce data processing difficulty because it improves performance of the regression method.

① 收稿日期:2014-01-29

基金项目:中国地震局 2015 年度震情跟踪合同制项目(2015010225)

作者简介:邢喜民(1980-),男,工程师,硕士,主要从事前兆数据分析。E-mail:24033663@qq.com

Key words: subsection regression; horizontal pendulum; correlation coefficient; regression equation

0 引言

形变台站建立在地壳表层,因而不可避免地要受到各种因素的影响,这就意味着在测量(观测)值序列中不仅包含有来自地球内部的地形变信息,还可能不同程度地包含了来自地球外部的信息。因此形变台站的地形变观测时间序列是多种信息的综合,是可进行分离的^[1]。

目前的认识水平有时难以区分干扰与地震前兆的变化形态,给前兆的异常判定带来很大困难^[2]。国内外已开展了不少对各种干扰因素定量的研究工作,如: Moro 等^[3]研究了降水、气压对意大利 NE 地震区倾斜和应变的影响;王梅^[2]论述了气压、雷电等干扰因素对数字化形变高频记录的影响及其机理;赵小贺等^[4]分析认为气压、大风、降雨是导致观测资料出现异常变化的主要因素,气压的短周期突变可导致固体潮曲线畸变;孙玉军等^[5]利用轴对称弹性模型有限元方法,计算了洞室中温度微小变化所引起的地倾斜和地应变;张昱等^[6]对甘肃地区数字化流体观测资料的干扰因素进行了系统的分析。

目前地震预测以观测事实归纳为主,并辅以物理模式演绎法。动力学预测(数值预报)为进一步追求目标的现状下,对影响观测数据的因素的定量判别也将是一个努力的方向。

1 台站、仪器概况

1.1 精河水平摆

精河台位于新疆博尔塔拉蒙古自治州精河县境内,高程为 387.3 m,位于博罗科努、准格尔南缘、科古琴三大断裂的交汇区。地质年代为古生代,岩性为黑灰色千枚岩和凝灰岩。山洞东西向为主洞,进深约 90 m,南北最长支洞约 12 m,宽约 2.2 m,上层覆盖约 37 m,洞内年温差 0.5 °C,日温差小于 0.1 °C,最大的干扰源是大风干扰。自 1990 年石英水平摆观测以来,年变周期明显,NS 分量以 S 倾为主。2006 年 11 月份数字化改造后,原始曲线 EW 分向年变幅度明显减小,由 E 倾转为 W 倾,NS 分量趋势变化不明显。以调和函数 M2 波潮汐因子中误差和长周期拟合相对噪声水平作为指标判定精河石英水平摆的数据观测质量,达到国家形变 I 类地震台标准。

1.2 库尔勒水平摆

库尔勒水平摆架设在库尔勒市北的霍拉山南坡。该区属暖温带大陆性干旱气候,冬季干冷;春季短暂,冷暖气候交替,天气多变,多大风、沙尘暴;夏季为低气压控制,空气对流强,常产生阵风;秋季短暂,常年刮东北风。山洞所在地区构造上处于南天山褶皱带与塔里木地台的交界部位,影响较大的主要有北轮台—辛格尔断裂和兴地断裂。洞内有一条走向 NE—NEE 的活动断裂,断裂上的元古界灰色黑云母片麻岩和大理岩逆冲在上新统砂砾岩层上。山洞全长 408 m,覆盖层厚度不论是顶部还是侧面均大于 50 m。洞内干燥,湿度 < 80%,洞内温度 15 °C 左右,年温差 < 0.5 °C。石英水平

摆倾斜仪架设在山洞的中部,仪器墩为预埋的整块花岗岩,用水泥与台基基岩相粘接。

2 研究方法

随机变量 Y 与变量 x (它可能是多维向量)之间的关系,当自变量 x 确定之后,因变量 Y 的值并不随之确定,而是按一定的统计规律(即随机变量 Y 的分布)取值,关系表示为

$$Y = f(x) + \epsilon$$

其中, $f(x)$ 是一个确定的函数,称为回归函数; ϵ 为回归残差序列。回归分析的主要任务之一是确定回归函数 $f(x)$ 。

回归分析的步骤:(1)根据研究目标,确定自变量和因变量;(2)进行相关分析。只有当变量与因变量确定存在某种关系时,建立的回归方程才有意义。相关分析一般是求出相关系数,以相关系数的大小来判断自变量和因变量的线性相关的程度;(3)建立回归模型。绘制自变量和因变量的散点图,依据散点图选择合适的数模,对自变量和因变量进行计算,在此基础上建立回归分析方程;(4)检验回归模型。由剩余方差的 F 统计量对应 P 值检验回归方程显著性,由可决系数向 1.0 的趋近性检验回归方程的拟合效果。在回归分析的基础上,确定出了气象数据对定点形变数据的合适的数学表达式,那么在一定程度上可以认为回归残差序列 ϵ 是剔除了气象因素干扰的定点形变数据。

在回归模型建立的过程中,定点形变的观测数据在不同时段呈现不一致的变化趋势,利用一个数学模型则无法完全描绘。那么在不同时段根据数据的变化趋势,采用不同数学模型来表达已是必然之势,这个必然将分段回归的需求凸显了出来。廖俊^[7]将时间序列进行分段线性表示,是降低时间序列数据处理难度的有效方法。

分段回归在具体的建模过程中首要任务就是分界点的判定。分界点是变形规律变化的转折点,是变形曲线的拐点,也成为变形数模类型改变的转折点。分界点既是前一种变形曲线的终点,又是后一种变形曲线的起点;变形数模在分界点前是一种类型,在分界点后又是另一种类型。分界点判别的正确与否直接影响数模的质量^[8]。

3 数据分析

3.1 精河水平摆

以精河水平摆观测数据为因变量,以气象因素为自变量,研究观测资料与气象因素之间的关系。选取的气象资料是新疆气象局的数据,地温数据资料自 2006 年 4 月 1 日起,这样限制了计算时段。但是经分析发现,精河地温滞后气温约 2.5 个月,将气温向前取 2.5 个月(也就是将气温数据相位向后平移 2.5 个月)代替地温值,通过计算两者的相关系数为 0.951 1,说明两者高度线性相关,因此可以用向前取 2.5 个月的气温值代替地温值计算。精河地区气象资料见图 1。

根据文献[9-10]编写程序代码,计算精河水平摆与气象因素之间的相关系数,计算结果见表 1。

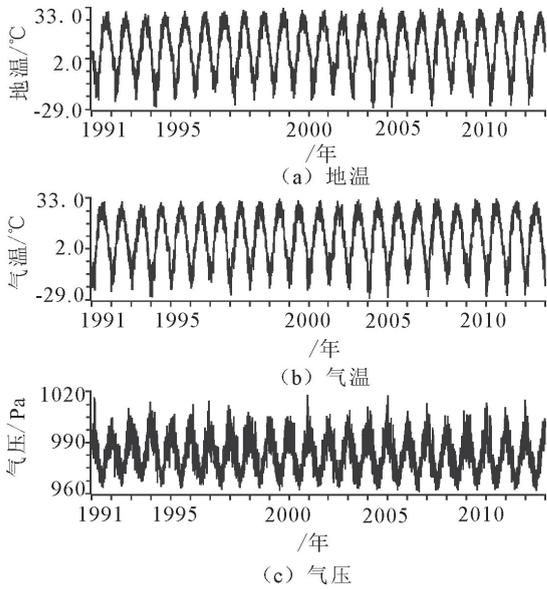


图 1 精河地温、气温、气压日值时序图

Fig.1 Daily value sequence diagram of ground temperature, air temperature and air pressure in Jinghe station

表 1 精河水平摆与气象因素相关系数

Table 1 The correlation coefficients of Jinghe horizontal pendulum observation data and meteorological factors

测项	地温	气温	气压
NS 向	-0.012 1	-0.016 2	0.040 5
EW 向	-0.310 7	-0.356 3	0.304 5

由表 1 可见,精河水平摆观测数据与气象要素之间线性关系较弱,但是从图 2 可以看出,精河水平摆观测数据不但具有年变周期规律,而且存在趋势转折变化。由图 1 可知,精河气象资料仅存在年变周期规律,并没有趋势变化。根据车用太等^[11]判断地下水干扰异常与排除中提出 4 个相关性原则中成因上的相关性,即:异常动态与其可能的影响因素之间存在成因上的关联,精河水平摆的趋势性转折变化并非气象因素的影响。因此,为了更好地把握气象因素对精河水平摆的影响特征,需要根据观测数据的趋势变化特征对数据

进行分段研究。

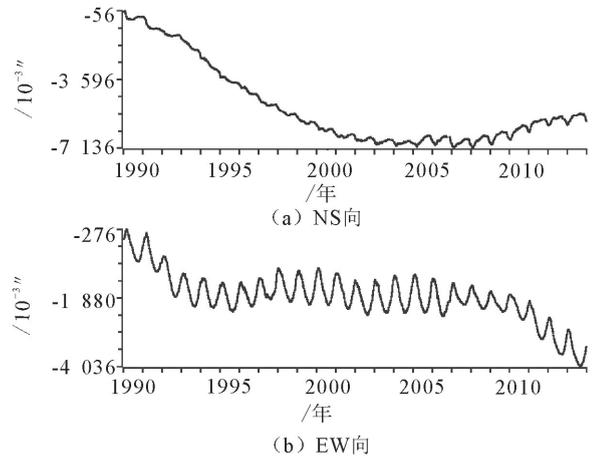


图 2 精河水平摆日值观测曲线

Fig.2 Daily value curves from horizontal pendulum in Jinghe station

根据文献[8],分段回归的分界点是变形规律变化的转折点,也是变形曲线的拐点^[7],所以观测数据曲线的每一个波峰点或波谷点都是分段回归的分界点。选择精河水平摆 EW 向 2003 年 9 月 1 日至 2004 年 1 月 25 日半个周期为研究对象,在这半个周期精河水平摆观测的数据与气压、气温、地温相关系数分别为 0.771 082 8、-0.944 855 9、-0.897 580 4,散点图见图 3。由上述计算结果可知,气温、地温是精河水平摆在这半个周期的主要影响因素,而且它们之间具有准线性关系。

由图 2 可看出,波峰或波谷并非精河水平摆长趋势变化的转折点。如果把每个波峰或波谷均作为分段回归的分界点,一是无法说明精河水平摆的年频段信息的变化与地温、气温、气压之间的关系;二是使研究变得复杂。根据精河水平摆观测曲线的趋势变化,粗略地将精河水平摆 EW 向分成 1992-01-01—1993-09-05, 1993-09-06—2009-12-31, 2010-01-01—2013-12-31 三段;NS 向分成 1992-01-01—2001-02-22, 2001-02-23—2003-02-10, 2003-02-11—2008-02-14, 2008-02-15—2013-12-31 四段。

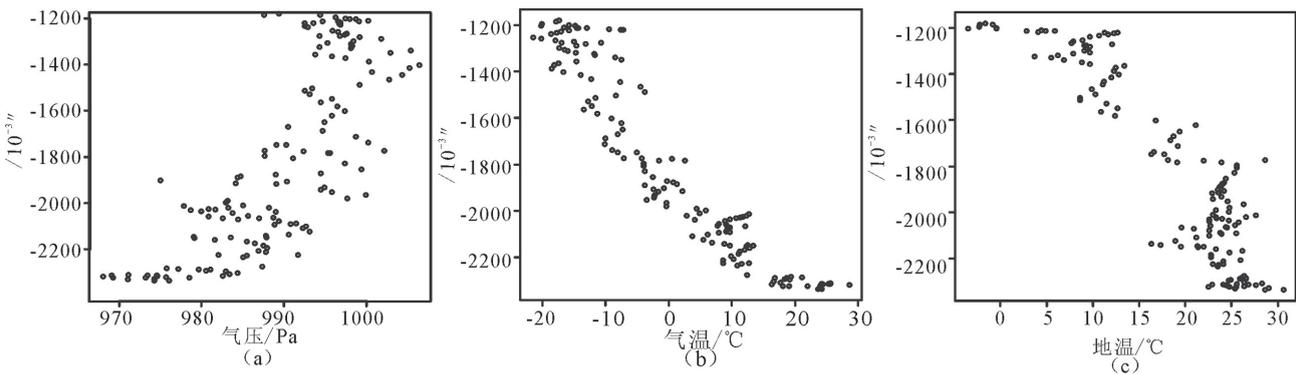


图 3 精河水平摆与气压、气温、地温散点图(2003-09-01—2004-01-25)

Fig.3 The scatterplots between Jinghe horizontal pendulum observation data and air pressure, air temperature, ground temperature (2003-09-01—2004-01-25)

在研究时,为了记录方便,记定点形变观测数据为 y ,地温为 x_1 ,气温为 x_2 ,气压为 x_3 。

精河水平摆 EW 向的三个时段中,因第一时段和第三时段存在趋势变化,所以分别采用直线 $y = 69\ 325.19 - 1.115\ 69x$ 和 $y = 72\ 510.733\ 76 - 1.349\ 06x$ 拟合去掉趋势变化,结果见表 2。由表 2 的可决系数说明三分段拟合方程的拟合效果较好。

对精河水平摆 NS 向四个时段的分析表明,第一时段影响观测值的主要因素为气压,其次是地温,它们之间可用一

元二次方程回归;第二、三、四时段,去掉趋势后发现影响观测数据的主要因素是地温,与地温相关系数分别为 0.791 2, 0.690 8, 0.688 0,与气温和气压相关性较小,同样分段利用绘制气象因素与观测值的散点图,确定最佳回归方程。

3.2 库尔勒水平摆

因库尔勒水平摆在 2006 年进行仪器改造,造成 2006 年缺数较多,因此选择研究日期从 2008 年 1 月 1 日起,分别计算库尔勒两分量与气象因素之间的相关系数(表 3)。计算结果表明,气象要素与观测数据之间线性关系较弱。

表 2 精河水平摆 EW 向分段回归分析结果

Table 2 Subsection regression analysis results of the EW-direction observation data from Jinghe horizontal pendulum

时段	相关系数			回归方程	可决系数	
	地温	气温	气压		原	修正
1	-0.758 8	-0.621 9	0.483 7	$y = 238.9 - 19.26x_1 - 14x_2 + \epsilon$	0.818 8	0.817 9
2	-0.553 6	-0.745 1	0.612 1	$y = -1\ 517 - 12.1x_1 - 21.92x_2 + \epsilon$	0.755	0.754 7
3	-0.592 7	-0.806 3	0.680 3	$y = 233.6 - 4.67x_1 - 14.29x_2 + \epsilon$	0.874 9	0.874 3

表 3 库尔勒水平摆与气象要素相关系数

Table 3 The correlation coefficients of Kuerle horizontal pendulum observation data and meteorological factors

测项	地温	气温	气压
SN 向	-0.139 8	-0.172 3	0.007 9
EW 向	0.339 1	0.062 6	0.047 5

由图 4 可以看出,库尔勒水平摆两分量存在趋势转折,根据趋势变化情况将库尔勒水平摆 NS 向分成 2008 年 1 月 1 日—2010 年 9 月 30 日,2010 年 10 月 1 日—2013 年 12 月 31 日二个时段,将 EW 向分成 2008 年 1 月 1 日—2009 年 3 月 20 日,2009 年 3 月 21 日—2011 年 10 月 31 日,2011 年 11 月 1 日—2013 年 12 月 31 日三个时段。

对于库尔勒水平摆 NS 向,由于第二时段存在趋势性变化,与精河水平摆一样,这种趋势变化并非气象因素造成的,采用直线 $y = 264\ 901.686\ 93 - 4.791\ 12x$ 拟合去掉趋势后,对两分段的回归分析结果见表 4。

表 4 的可决系数说明两分段拟合方程的拟合效果好。

表 4 库尔勒水平摆 NS 向分段回归分析结果

Table 4 Subsection regression analysis results of the NS-direction observation data from Kuerler horizontal pendulum

时段	相关系数			回归方程	可决系数	
	地温	气温	气压		原	修正
1	0.545	0.206	-0.061	$y = -6177 + 806.0x_1 - 25.27x_1^2 + 33.83x_2 - 1.305x_2^2 + \epsilon$	0.600 2	0.589 6
2	0.797 5	-0.142 8	0.327 1	$y = -7\ 745.428\ 2 - 73.899\ 9x_1 + 7.263\ 7x_3 + \epsilon$	0.672 4	0.671 8

趋势后,第一时段影响观测值的主要为气温和气压,相关系数分别为 -0.667 1 和 0.686 8,与地温相对相关性较小,相关系数仅为 0.454;第二、三时段影响观测数据的主要因素是地温,与地温相关系数分别为 0.680 8 和 0.648 6,与气温和气压相关性较小。

4 结论与讨论

由回归分析的过程及结果,可以得到如下结论:

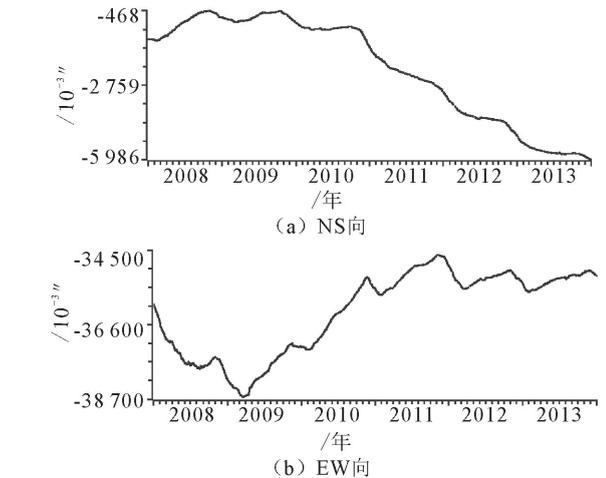


图 4 库尔勒水平摆日值观测曲线

Fig.4 Daily value curves from horizontal pendulum in Kuerle station

对库尔勒水平摆 EW 向三个时段分析结果表明,去掉

(1) 观测数据的周期性变化使得分段回归的分界点的选取变得困难,但是分界点是观测曲线趋势变化的转折点,所以观测数据分段的过程就是对定点形变趋势变化认识的过程。从另一方面来说,虽然数据分段具有一定的人为性,但是在保证每个分段曲线具有相同趋势变化的情况下,由精河水平摆半个周期和各分段计算的结果表明,分段的不同不会影响研究结果;地温和气温是影响精河、库尔勒水平摆观测数据年频段信息的主要因素,它们之间具有准线性关系。

(2) 孙毅^[12]研究了川滇菱形块体内定点连续形变长周期频段信息和块体构造活动的关系。研究结果表明,在川滇菱形块体内,定点连续形变观测获得的长周期频段信息中的长趋势变化,除去仪器零漂等局部干扰外,基本上和块体运动方向或者块体边界主干断裂活动方式相一致,表明在定点连续形变长周期频段信息中也存在有与地震孕育有关的地壳形变信息。姜振海等^[13]对甘肃岷县漳县 M_s 6.6 地震与甘肃形变异常情况探讨表明,在地震前宕昌、临县、兰州三地震台的部分定点形变均存在趋势转折变化。本文通过直线拟合去掉趋势之后,观测数据与气象因素之间的线性相关性明显增强,说明观测数据的趋势变化不是气象因素造成的,可能是区域的构造应力变化所致。如王在华^[14]研究新疆新源、和静交界 M_s 6.6 地震前形变异常,结果表明库尔勒水平摆两分向 2009 年出现趋势转折和精河水平摆 2009 年 NS 向 N 倾的趋势转折均与该地震有关。

(3) 从研究方法上来说,分段回归是全样本回归分析方法的一种改进,是降低时间序列数据处理难度的有效方法。

(4) 气象因素在不同时段对精河、库尔勒水平摆观测数据的影响程度不同(如库尔勒水平摆 EW 向,第一时段的主要影响因素是气温、气压,第二、三时段的主要影响因素是地温),这可能与观测环境的改变有关。

(5) 2008 年王海涛^[15]提出了一种可以直接应用于变化相对平稳资料的分析,以及时间进程数据前兆异常识别研究的 ECRS 方法,并且指出对存在趋势性变化或周期性年变的资料以及由畸变点的资料,应进行去倾、拟合残差、畸变点插值剔除等预处理。该方法提出之后在测震学科的异常识别中有比较好的应用,但在前兆学科应用较少,而本文的研究将有助于 ECRS 方法在定点形变数据异常识别的应用。2011 年唐兰兰^[16]根据 ECRS 方法的定义和识别方法研制的软件,也将使下一步的研究更便利。

参考文献 (References)

- [1] 中国地震局监测预报司. 地形变测量[M]. 北京:地震出版社, 2008.
China Earthquake Administration Department of Earthquake Monitoring and Prediction. Ground Deformation Measurement [M]. Beijing: Seismological Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 王梅,李峰,孔向阳,等. 数字化形变观测干扰识别[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(1): 94-98.
WANG Mei, LI Feng, KONG Xiang-yang, et al. Identification of Disturbance of Digital Deformation Observations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(1): 94-98. (in Chinese)
- [3] Moro G D, Zadro M. Subsurface Deformations Induced by Rainfall and Atmospheric Pressure: Tilt/Strain Measurements in the NE Italy Seismic Area[J]. Earth and Planet Science Letters, 1998, 164: 193-203.
- [4] 赵小贺,卢双苓,冯志军,等. 洞体形变数字化观测干扰分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2009, 30(4): 55-62.
ZHAO Xiao-he, LU Shuang-ling, FENG Zhi-jun, et al. Analysis of Disturbance of Digital Cavity Deformation Observation[J].

- Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2009, 30(4): 55-62. (in Chinese)
- [5] 孙玉军,李杰,曹建玲,等. 深部洞室中微小温度年度变化足以造成地应变年度变化[J]. 地震学报, 2008, 30(5): 464-473.
SUN Yu-jun, LI Jie, CAO Jian-ling, et al. Small Variation of Annual Temperature in Deep Tunnel can Produce Annual Variation in Tilt and Strain[J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(5): 464-473. (in Chinese)
- [6] 张昱,吴建华,范兵,等. 数字化流体观测资料干扰因素分析[J]. 西北地震学报, 2013, 35(增刊): 122-125.
ZHANG Yu, WU Jian-hua, FAN Bing, et al. Analysis of the Interference Factors in Digital Fluid Observation Data[J]. Northwestern Seismological Journal, 2013, 35(Suppl): 122-125. (in Chinese)
- [7] 廖俊,于雷,罗寰,等. 基于趋势转折点的时间序列分段线性表示[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(30): 50-53.
LIAO Jun, YU Lei, LUO Huan, et al. Time Series Piecewise Linear Representation Based on Trend Transition Point[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(30): 50-53. (in Chinese)
- [8] 徐兮. 分段回归在隧道沉降变形监测中的应用研究[J]. 测绘通报, 2007(12): 18-20.
XU Xi. Applied Investigation of Subsection Regression in the Inspection of Tunnel Settlement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(12): 18-20. (in Chinese)
- [9] 李秀敏,蔡霞. 使用统计软件 R 进行多元回归分析[C]//国际应用统计学术研讨会. 2008.
LI Xiu-xia, CAI Xia. Using the Statistical Software R Multiple Regression Analysis[C]//International Conference on Applied Statistics, 2008. (in Chinese)
- [10] Paul Murrell R. Graphics[M]. Computer Science and Data Analysis Series, 2006.
- [11] 车用太,鱼金子,刘成龙,等. 判别地下水异常的干扰性与前兆性的原则及其应用实例[J]. 地震学报, 2011, 33(6): 800-808.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi, LIU Chen-long, et al. Principles on Distinguishing Interference from Seismic Precursor of Underground Water Variation and Its Application[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(6): 800-808. (in Chinese)
- [12] 孙毅,汪智. 定点连续形变长周期频段信息研究[J]. 四川地震, 2005(2): 35-39.
SUN Yi, WANG Zhi. Relationship Between the Long-term Changes of the Crustal Tilt Observation in Seismic Stations and the Activities of Earthquake Structures[J]. Earthquake Research in Sichuan, 2005(2): 35-39. (in Chinese)
- [13] 姜振海,翟伟,王小娟. 甘肃岷县漳县 M_s 6.6 地震与甘肃形变异常情况探讨[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 549-556.
JIANG Zhen-hai, ZHAI Wei, WANG Xiao-juan. Analysis of the Relationship between Abnormal Ground Deformation of Gansu and the Minxian-Zhangxian M_s 6.6 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 549-556. (in Chinese)
- [14] 王在华,滕海涛. 新疆新源和静交界 M_s 6.6 地震前形变异常[J]. 内陆地震, 2012, 26(4): 347-353.

- WANG Zai-hua, TENG Hai-tao. Deformation Anomalies Before Xinyuan, Hejing Earthquake with $M_s 6.6$ [J]. *Inland Earthquake*, 2012, 26(4): 347-353. (in Chinese)
- [15] 王海涛, 王琼. 基于地震对应概率谱分析的前兆异常识别研究[J]. *地震研究*, 2008, 31(4): 330-334.
- WANG Hai-tao, WANG Qiong. Precursor Anomaly Identification Based on Earthquake Corresponding Probability Spectrum Analysis[J]. *Journal of Seismological Research*, 2008, 31(4): 330-334. (in Chinese)
- [16] 唐兰兰, 王海涛, 王琼. 新疆中强地震前 ECRS 方法的异常研究[J]. *西北地震学报*, 2011, 33(2): 159-165.
- TANG Lan-lan, WANG Hai-tao, WANG Qiong. Research on Anomaly of ECRS Method Before Moderate-strong Earthquakes in Xinjiang Region [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(2): 159-165. (in Chinese)

(上接 622 页)

- [4] 马见青, 李庆春. 提高台站地震资料信噪比的自适应极化滤波[J]. *地震工程学报*, 2014, 36(2): 398-404.
- MA Jian-qing, LI Qing-chun. Adaptive Polarization Filtering for Improving the S/N of Station Seismic Data [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(2): 398-404. (in Chinese)
- [5] 刘静伟, 王振明, 谢富仁, 等. 大华北地区地震灾害与风险评估[J]. *地震工程学报*, 36(1): 134-143.
- LIU Jing-wei, WANG Zhen-ming, XIE Fu-ren, et al. Seismic Hazard and Risk Assessments in North China Based on the Historical Intensity Observations [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(1): 134-143. (in Chinese)
- [6] 张冰, 周铭, 谭静, 等. 塔里木盆地及其邻区 Love 波层析成像研究[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(4): 893-899.
- ZHANG Bing, ZHOU Ming, TAN Jing, et al. Love Wave Tomography in the Tarim Basin and Its Adjacent Region [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(4): 893-899. (in Chinese)