

沂沭断裂带垂直形变的灰色关联分析应用研究*

朱成林¹, 贾媛^{1,2}, 李建奎¹, 李杰¹

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 山东省地震工程研究院, 山东 济南 250021)

摘要: 以一沂沭断裂带剖面水准测线为例, 应用灰色关联分析方法研究了沂沭断裂带垂直剖面形变的空间分布特征。通过测点序列距离变化前后的关联度矩阵和关联序的差异研究垂直剖面的整体倾斜性变化特征, 并研究了水准测线剖面形变时间上的时段性分布特征。实例表明灰色关联分析可以作为一种有实用价值的分析方法应用于断裂带垂直形变分析中。

关键词: 沂沭断裂带; 剖面水准; 灰色关联; 垂直形变

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)02-0173-05

0 引言

断裂带是地震多发地带, 因此对断裂带区域的垂直形变监测工作及研究受到多方关注(李杰等, 2001, 2002, 2011)。为了监测断裂带区域的垂直形变, 通常会在断裂带不同位置布设长度不等的横跨主要断裂带的长水准剖面测线。相比于跨断层短水准测量的定点观测, 剖面水准测量更能从整体上反映断裂带在空间上和时间上的垂直形变规律。

由于剖面水准测量的测线较长, 通常观测周期较长, 加之观测误差等因素, 给分析单测点的变化曲线带来了困扰。但是剖面测线上的各个测点间以及不同观测周期的剖面曲线间具有某种关联性的, 因此可以利用这种不确定的关联性来研究垂直剖面形变的空间和时间分布特征。这种不确定的关联性在灰色系统理论(邓聚龙, 1985; 彭立国, 陆明勇, 2004)中被称为灰色关联。

灰色关联分析(王成亮等, 2000; 门可佩, 夏建平, 1995)是灰色系统理论的重要内容之一, 其基本思想是通过曲线间几何形状的分析对因素进行比较, 是以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献程度而进行的一种分析方法。本文利用灰色关联分析方法从整体上研究垂直剖面形变的空间和时间分布特征, 并将此方法应用于沂沭断裂带的剖面分析中。

1 灰色关联分析简介

灰色系统理论中的灰关联是指事物之间的不确定性关联, 或系统因子与主行为因子之间的不确定性关联。灰色关联分析方法, 是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近, 以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度而进行的一种分析方法(黄声享等, 2002)。它根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间的关联程度。该方法具有以下优点: (1) 对样本量的大小没有太高的要求; (2) 对序列本身要求不高, 不需要特别顾及序列的分布规律; (3) 分析的结果一般与定性分析相吻合, 具有广泛的实用价值。

设 $x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ 为参考序列; $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为比较序列, 则 $x_i(k)$ 与 $x_0(k)$ 的关联系数可以表示为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中, ρ 为分辨系数, ρ 越小分辨率越大, 一般 ρ 的取值区间为 $[0, 1]$, 通常取 $\rho = 0.5$ 。

设参考序列 $x_0(k)$ 与比较序列 $x_i(k)$ 的关联度为 γ_i , 则灰色关联度定义为

* 收稿日期: 2012-03-22.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH13015)和山东省地震局重点科研基金(JJ1109Y)联合资助。

$$\gamma_i = \gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k).$$
 (2)

按关联度大小排序即为关联序。关联序的大小体现了比较因子对参考因子的影响及作用的大小。

2 垂直剖面形变的分析应用

沂沭断裂带位于郯庐断裂带的中段，贯穿山东中部地区，是山东境内最活跃的断裂带之一。历史上，在该带及邻近的北西向断裂带上曾发生多次较大地震（李杰等，2002）。为此，山东省地震局在此断裂带不同位置布设了寿沂测线等4条长度为25~44 km的长水准剖面测线，测线观测周期为1年。其中寿沂测线位于沂沭带北段，是横跨沂沭带北西向断裂（自南向北主跨双山—李家庄断裂、上五井断裂、益都—无棣断裂和昌乐—广饶断裂）的南北走向测线（图1），全长约44 km。自南向北的测点分别为寿沂8、寿沂6、寿沂5、寿沂3和寿沂2（寿沂10为基准点）。本文以寿沂测线为例，利用灰色关联分析方法研究沂沭断裂带垂直剖面形变的空间和时间分布特征。

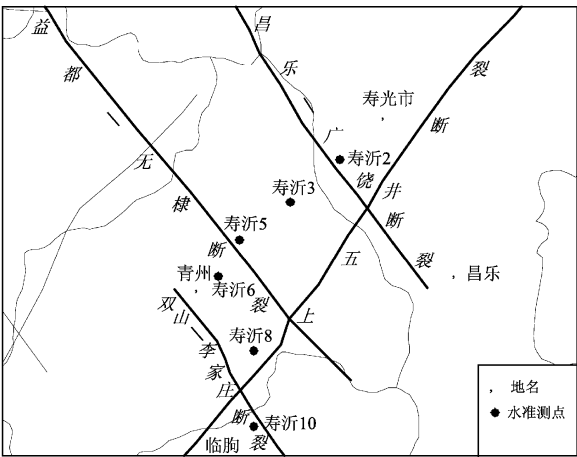


图1 寿沂测线点位示意图
Fig. 1 Schematic diagram of measuring point position on Shouyi measuring line

2.1 垂直形变的空间分布特征

寿沂测线各测点相对于2000年观测的垂直变化曲线如图2所示。分别以各测点的观测序列为参考序列，以所有测点的观测序列为比较序列，按照式（1）、式（2）可以求出测线上各测点序列的关联度矩阵如表1所示（列向为参考序列，行向

为比较序列，下同），根据关联序的定义可以得到比较序列对各参考序列的关联序如表2所示（列向为参考序列；行向为关联度大小排序，首行数字为关联序排序，下同）。

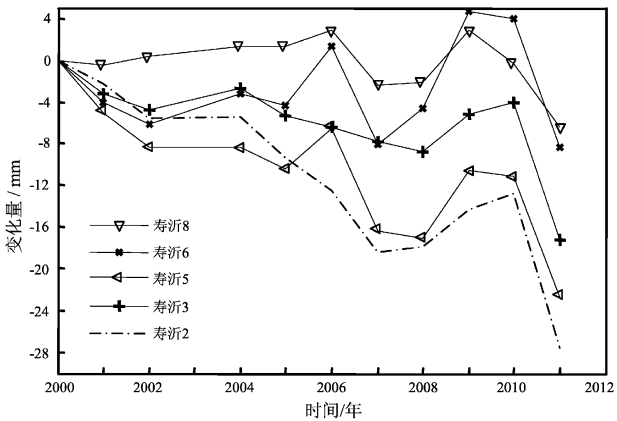


图2 寿沂测线各测点垂直变化曲线
Fig. 2 Vertical variation curves of each measuring points on Shouyi measuring line

表1 寿沂测线各测点序列的关联度矩阵
Tab. 1 Correlation degree matrix of each measuring point sequences on Shouyi measuring line

	寿沂8	寿沂6	寿沂5	寿沂3	寿沂2
寿沂8	1	0.745 7	0.494 7	0.640 7	0.497 6
寿沂6	0.727 2	1	0.568 4	0.742 8	0.560 2
寿沂5	0.432 8	0.534 3	1	0.644 1	0.756 1
寿沂3	0.482	0.647 8	0.555 1	1	0.522
寿沂2	0.497 6	0.579 7	0.798 2	0.662	1

表2 寿沂测线各测点序列的关联序（括号中数值为关联度）
Tab. 2 Relational order of each measuring point sequences on Shouyi measuring line (the value in the brackets is correlation degree)

参考序列	1	2	3	4
SY8(1)	SY6(0.745 7)	SY3(0.640 7)	SY2(0.497 6)	SY5(0.494 7)
SY6(1)	SY3(0.742 8)	SY8(0.727 2)	SY5(0.568 4)	SY2(0.560 2)
SY5(1)	SY2(0.756 1)	SY3(0.644 1)	SY6(0.534 3)	SY8(0.432 8)
SY3(1)	SY6(0.647 8)	SY5(0.555 1)	SY2(0.522)	SY8(0.482)
SY2(1)	SY5(0.798 2)	SY3(0.662)	SY6(0.579 7)	SY8(0.497 6)

根据寿沂测线各测点序列间的关联度（1表）及其关联序（表2）可以发现所有测点按照变化趋势可以分为2组：一组为寿沂8、寿沂6和寿沂3，

它们之间关联度较大，垂直形变趋势相对一致；另一组为寿沂 5 与寿沂 2，它们之间关联度较大，垂直形变趋势相对一致。结合图 1 所示的测点分布示意图，可以考虑这种趋势上的分组现象可能与断裂分布有关：益都—无棣断裂和昌乐—广饶断裂的南侧和北侧分别具有同趋势性。寿沂 5 与寿沂 2 和其它测点垂直变化趋势的不同，很可能是由于它们相比于其它测点更加靠近断裂，受断裂的影响更为直接。

为了研究测线剖面垂直形变与距离之间的关系，将各个测点的形变量进行距离改化。距离改化方法是各个测点的形变量除以该测点距离基准点的距离，组成新的观测序列。对距离改化后测点序列进行灰色关联分析，计算关联度矩阵如表 3 所示。

表 3 寿沂测线各测点序列经距离改化后的关联度矩阵
Tab. 3 Correlation degree matrix of each measuring point sequences divided by distance on Shouyi measuring line

	寿沂 8	寿沂 6	寿沂 5	寿沂 3	寿沂 2
寿沂 8	1	0.650 5	0.500 1	0.685 5	0.619 9
寿沂 6	0.615 2	1	0.573 5	0.696 4	0.641 7
寿沂 5	0.500 1	0.606 2	1	0.607 5	0.716 3
寿沂 3	0.617 7	0.657 8	0.524 3	1	0.700 4
寿沂 2	0.601 9	0.656 4	0.698 6	0.749 6	1

通过表 3 和表 1 的对比发现：（1）对测点序列进行距离改化后，距离较远的寿沂 5、寿沂 3、寿沂 2 与距离较近的寿沂 8、寿沂 6 的关联度均有所提高；（2）相对于表 1，表 3 中关联度矩阵中的元素更为均匀。距离改化前后关联度矩阵以及关联序的变化，说明寿沂测线各个测点的形变量与距离具有正相关性，亦说明了寿沂测线所观测的断裂带剖面具有整体倾斜特征，垂直形变及应变随距离增加而增强。通过 2010 ~ 2011 年的观测资料可以从整体上计算各测点的年均速度并绘制速度剖面图（图 3），整体上寿沂测线的年均形变量在剖面空间的分布梯度为 $-0.056\text{ mm}/(\text{a} \cdot \text{km})$ 。垂直形变随着距离的增加而增强，除了误差累积的因素之外，反应了多个断裂应变的积累。另一方面，受剖面中间断裂的影响，剖面不同区域可能出现不同形变趋势的分组现象，寿沂 5 和寿沂 2 形变更为突出。

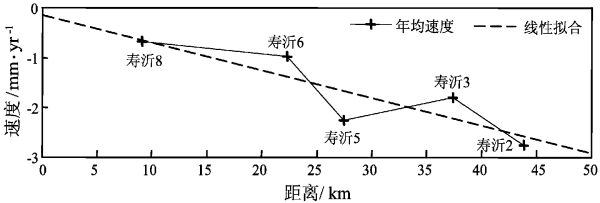


图 3 寿沂测线的速度剖面及其线性拟合
Fig. 3 Velocity profile of Shouyi measuring line and its linear fitting

2.2 垂直形变的时间特征

为了分析寿沂测线垂直剖面形变的时间特征，以 2000 年作为基准剖面绘制 2000 ~ 2011 年的垂直剖面变化情况曲线，反映了各年测点的高差情况（图 4）。分别以各年份的垂直剖面曲线作为参考序列，其它年份的剖面曲线作为比较序列，按照式（1）、式（2）即可以求出寿沂测线各年剖面序列的关联度矩阵（表 4）和关联序（表 5）。从表 4、表 5 可以发现寿沂测线垂直剖面形变具有以下时段性分布特征：

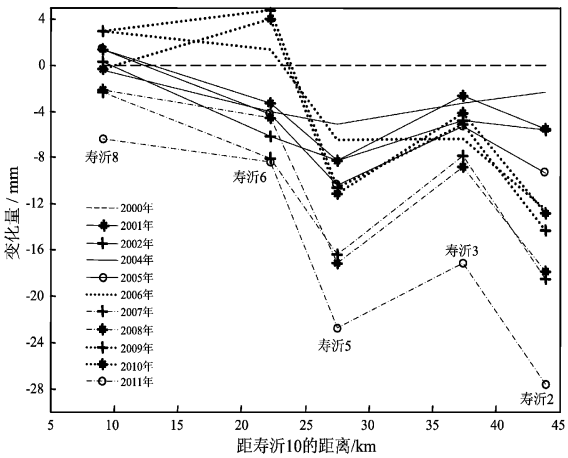


图 4 寿沂测线各年的剖面垂直变化曲线
Fig. 4 Vertical variation curves of profile of Shouyi measuring line in each year

- （1）2001 ~ 2005 年垂直剖面曲线之间关联度较大，具有趋势上一致稳定性，可以将这簇剖面曲线看作是剖面垂直形变的正常背景变化。
- （2）2007 ~ 2008 年垂直剖面曲线关联度较大，而且从关联序上看出与其 2001 ~ 2005 年剖面曲线簇的关联度很低。说明了从时间特征上看，寿沂测线所描述的沂沭断裂北段的垂直形变也在 2007 ~ 2008 年出现了较大的应力调整（李杰等，2011）。

(3) 2009 ~ 2010 年剖面曲线关联度较大,从关联序上看出其相比于 2007 ~ 2008 年,与 2001 ~ 2005 年的剖面曲线簇关联度较高,因此可以认为这一时段中的应力处于释放回调阶段。

(4) 2011 年剖面曲线与以往各年份的剖面曲

线关联序基本上处于末尾,与 2001 ~ 2005 年的剖面曲线的关联度明显低于其它年份曲线的关联度,因此可以看出 2011 年以来寿沂测线所描述的沂沭断裂北段的应力调整处于最高位,需要进一步密切跟踪监测其垂直变化趋势。

表 4 寿沂测线各年剖面序列的关联度矩阵

Tab. 4 Correlation degree matrix of the profile sequence of Shouyi measuring line in each year

	2000	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
2000	1	0.83	0.75	0.78	0.71	0.72	0.60	0.62	0.67	0.72	0.49
2001	0.82	1	0.86	0.87	0.81	0.75	0.66	0.70	0.69	0.75	0.53
2002	0.71	0.84	1	0.91	0.86	0.75	0.70	0.69	0.73	0.76	0.54
2004	0.74	0.86	0.91	1	0.86	0.76	0.63	0.67	0.73	0.75	0.49
2005	0.63	0.77	0.84	0.84	1	0.76	0.66	0.70	0.79	0.78	0.49
2006	0.62	0.67	0.69	0.70	0.74	1	0.59	0.60	0.81	0.77	0.41
2007	0.51	0.60	0.66	0.59	0.66	0.62	1	0.89	0.63	0.64	0.65
2008	0.53	0.64	0.65	0.62	0.70	0.62	0.89	1	0.63	0.65	0.60
2009	0.53	0.57	0.66	0.65	0.76	0.79	0.57	0.57	1	0.85	0.38
2010	0.60	0.67	0.70	0.68	0.75	0.76	0.59	0.60	0.85	1	0.40
2011	0.49	0.55	0.59	0.55	0.58	0.54	0.73	0.69	0.54	0.55	1

表 5 寿沂测线各年剖面序列的关联序 (表中数值为年份)

Tab. 5 Relational order of the profile sequence of Shouyi measuring line in each year (the value in the table is year)

参考序列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2000	2001	2004	2002	2006	2010	2005	2009	2008	2007	2011
2001	2004	2002	2000	2005	2010	2006	2008	2009	2007	2011
2002	2004	2005	2001	2010	2006	2009	2000	2007	2008	2011
2004	2002	2005	2001	2006	2010	2000	2009	2008	2007	2011
2005	2002	2004	2009	2010	2001	2006	2008	2007	2000	2011
2006	2009	2010	2005	2004	2002	2001	2000	2008	2007	2011
2007	2008	2005	2002	2011	2010	2009	2006	2001	2004	2000
2008	2007	2005	2002	2010	2001	2009	2006	2004	2011	2000
2009	2010	2006	2005	2002	2004	2008	2001	2007	2000	2011
2010	2009	2006	2005	2002	2004	2001	2008	2000	2007	2011
2011	2007	2008	2002	2005	2010	2001	2004	2009	2006	2000

3 结语

灰色关联分析根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间的关联程度,为研究断裂带垂直剖面形变的空间和时间分布特征提供了定量依据,并具有和定性分析相一致的优点。本

文通过实例表明,将灰色关联分析应用于断裂列带垂直剖面形变分析,通过计算关联度矩阵及关联序可以排除个别测点误差或点位稳定性的影响,从整体上分析断裂带的形变规律,也可以得到垂直形变的区域分布特性;通过测点序列距离改化前后的关联度矩阵的对比分析,可以直观发现各测点各期形变量与距离的关系是否显著,进而发

现剖面测点各期变化是否具有整体倾斜性;通过对各年份垂直剖面曲线的灰色关联分析,可以从整体上得到垂直剖面形变的时间分布特征。因此灰色关联分析可以作为一种有价值的分析方法应用于断裂带垂直形变分析中。

衷心感谢山东省地震预报研究中心流动监测研究室为本文提供的测量数据。

参考文献:

邓聚龙. 1985. 灰色控制系统[M]. 武昌:华中工学院出版社.

黄声享,尹晖,蒋征. 2002. 变形监测数据处理[M]. 武汉:武汉大学

出版社.

李杰,韩海华,闫德桥,等. 2002. 沂沭断裂带垂直形变与断层活动特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,22(2):106-111.

李杰,殷海涛,吴晨,等. 2011. 沂沭断裂带跨断层形变异常及其解释[J]. 大地测量与地球动力学,31(4):18-21.

李杰,赵金花. 2001. 苍山5.2级地震前后沂沭断裂带地壳垂直形变时空动态演化特征[J]. 地震研究,24(4):307-314.

门可佩,夏建平. 1995. 地震前兆资料的灰关联综合分析方法[J]. 地震, (2):137-142.

彭立国,陆明勇. 2004. 灰色系统理论在地震预报中的应用[J]. 大地测量学与地球动力学,24(5):120-123.

王成亮,柴文生,梁东洲,等. 2000. 灰色关联度在地震预报中的应用[J]. 华北地震科学,18(4):48-52.

Application Research of Grey Correlation Analysis on Vertical Deformation of Yishu Fault Zone

ZHU Cheng-lin¹, JIA Yuan^{1,2}, LI Jian-kui¹, LI Jie¹

(1. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China)

(2. Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250021, Shandong, China)

Abstract

Taking the leveling line crosses the Yishu fault zone profile as an example, we applied grey correlation analysis to study the deformation spatial distribution characteristics of the Yishu fault vertical profile. The difference of correlation degree matrix and relational order before and after the distance correction on measuring points sequence showed that the Yishu fault zone profile had the characteristic of overall tilt in different periods. Through studying the vertical profile curve among every year, we found that the deformation of this profile had the characteristic of period distribution. The example shows that the grey correlation analysis is a practical analyze method in the application of vertical deformation analysis on the fault zone.

Key words: Yishu Fault zone; profile leveling; grey correlation; vertical deformation