

# R/S 分析法对矿区地表沉陷预测

伍梦清,龙四春\*,张立亚

(湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;  
湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为提高矿区开采过程中地表沉陷安全性,研究其具有复杂非线性特征的沉降规律.以某矿区重点区域的沉降变化为例,通过分形理论的 R/S 分析法计算不同监测点的变形时间序列的 Hurst 指数,根据 Hurst 指数的值域划分,对矿山重点区域的沉降趋势及其强度进行了预测,并将预测结果和实测值进行了对比.研究表明:该矿区重点区域 8 个沉降监测点沉降序列的 Hurst 指数最小为 0.894 9,8 个监测点的沉降趋势与历史沉降趋势之间呈现出较强的持续性,即矿区重点区域的沉降趋势将减弱,且减弱趋势较为明显,这与同期的沉降变化趋势是相一致的.

**关键词:**重标极差分析(R/S)法;赫斯特指数;沉陷监测

中图分类号:TD73 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2017)03-0062-06

## R/S Analysis Method and Research on the Mining Surface Subsidence Prediction

Wu Mengqing, Long Sichun, Zhang Liya

(Hunan Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to improve the settlement safety of earth surface during mining, the complex nonlinear settlement regularity are studied. According to the settlement of a certain mining important area, we calculate the Hurst index of different monitoring deformation time series by using the R/S analysis method based on fractal theory. Based on the range of the Hurst index, subsidence trend of mining important area and its intensity is forecasted, and the predicted results and the measured values are compared. Results show that the Hurst index of the sedimentation sequence of the eight settlement monitoring points in the key area of the mine is 0.8949, and the settlement trend of the eight monitoring points shows a strong continuity with the historical settlement trend. In other words, the settlement trend of the key area will be weakened, and the weakening trend is more obvious, which is consistent with the trend of the same period of sedimentation changes.

**Keywords:** Rescaled Range Analysis(R/S) method; Hurst exponent; subsidence monitoring

在矿区开采过程中,采矿所引起地表沉降往往会危及到矿区安全.当矿区地表沉降速率或沉降量达到某个阈值时就可能导致严重的安全事故.因此,为了避免安全事故的发生,研究矿区的沉降规律并对其进行矿区的沉降趋势预测就显得至关重要.国内外针对开采沉陷预测所采取的研究方法和预测方法主要是基于实测资料总结经验公式、开采沉陷的模拟分析、对理论进行研究分析的方法<sup>[1-4]</sup>.近年来,随着研究技术和方法的发展,矿区沉陷预测理论得到了进一步的发展,目前相对较为盛行的研究方法如 3S 技术、灰

收稿日期:2016-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41474014);湖南省教育厅重点资助项目(15A060)

\*通信作者,E-mail: sclong@hnust.edu.cn

色系统理论、模糊预测模型、神经网络等.龙四春基于概率积分和 GIS 基本原理结合实测数据,对矿区开采地表沉降进行了预测<sup>[5]</sup>;韩国 Hahn Chul Jung 利用星载合成孔径雷达(SAR)技术对废弃煤矿进行沉降观测<sup>[6]</sup>;刘德元在矿区工程地质勘查和变形监测数据收集的基础上,利用 MAPGIS 软件构建了矿区开采沉降预计模型<sup>[7]</sup>;H Xu 等利用改进的灰色预测模型研究了河南省平顶山煤矿采矿对地表变形的影响<sup>[8]</sup>;Y Kim 等在韩国 27 个废弃矿山的 247 个沉降区的调查基础上,应用人工神经网络对其进行预测并对预测结果进行了验证<sup>[9]</sup>;连增增利用模糊数学理论和方法,建立了模糊关系方程,预计了煤矿开采沉降地表最大沉降值<sup>[10]</sup>.

重标度极差分析法(R/S, Rescaled Range Analysis)是一种以分形理论为基础的研究非线性时间序列的有效方法,具有适用范围广、稳健性强等诸多优点,特别适用于挖掘复杂非线性时间序列的内在规律<sup>[11]</sup>.近年来,R/S 分析法被大量用于金融、水文、生物化学、气象、地质等<sup>[12-17]</sup>诸多领域的预测预报中,取得了不错的效果.但是很少有将 R/S 分析法用于矿山沉降监测的报告.本文将 R/S 分析法应用于矿山沉降研究,这对于获取矿山沉降规律,如沉降量时间序列的长期记忆性及矿山沉降的系统演变趋势有一定意义.

## 1 R/S 分析模型与应用特性

R/S 分析法通常用来分析时间序列的分形特征和长期记忆过程,最初由英国水文学家赫斯特(Hurst, 1951 年)在研究尼罗河水坝工程时提出的方法.后来,它被用在各种时间序列的分析之中.这一分析理论的核心参量是 Hurst 指数.

### 1.1 R/S 分析法的基本内容

设定一个时间序列  $\{Y_t\}, t=1, 2, \dots$ , 有以下计算.

1) 若将时间序列划分为  $N$  个间距为  $M$  的相邻子区间  $U_z (z=1, 2, \dots, N)$ , 那么对于子区间, 其样本均值为

$$EU_z = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{i+(z-1) \times M}. \quad (1)$$

2) 定义子区间  $U_z$  相对其均值的累计离差:

$$L_{z,i} = \sum_{i=1}^M (Y_{i+(z-1) \times M} - EU_z). \quad (2)$$

$U_z$  序列相对累计离差的极差定义为

$$R_{U_z} = \max_{1 \leq i \leq M} L_{z,i} - \min_{1 \leq i \leq M} L_{z,i}. \quad (3)$$

3)  $U_z$  序列的标准差为

$$S_{U_z} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (Y_{i+(z-1) \times M} - EU_z)^2}. \quad (4)$$

4) 引入无量纲比值 R/S, 对 R 重新标度, 即得时间序列  $\{Y_t\}$  重标极差为

$$(R/S)_M = \frac{1}{N} \sum_{z=1}^N (R_z/S_z). \quad (5)$$

英国学者霍斯特利用式(5)对河流流量、降雨量等进行研究后,发现时间序列的很多记录结果可由下面的经验公式表示:

$$(R/S)_M = CM^H. \quad (6)$$

$$\text{两边取对数得: } \ln(R/S)_M = H \ln M + \ln C. \quad (7)$$

式中:  $H$  为 Hurst 指数,  $C$  为常数.通常把具有式(6)指数形式时间序列的自然现象称为赫斯特现象.

通过改变子区间的长度  $M$ , 就能得到不同长度下的序列  $\{Y_t\}$  的重标极差, 在坐标中绘制  $\ln(R/S)_M$  和  $\ln M$  绘制坐标点, 并进行回归分析, 其斜率就是所求  $H$  值.赫斯特指数通常用来度量序列相关性和趋势强度, 其反映了某一自然现象的内在固有性质, 进一步将 R/S 分析应用于随机试验可发现其具有以下性

质<sup>[11-18]</sup>;当 $H=0.5$ 时,序列呈现出随机游走,是一个标准的布朗运动;当 $H$ 偏离 $0.5$ 时,时间序列将具有长期相关性,并且偏离越远,相关性越明显;当 $0.5 < H < 1$ 表明时间序列就有持续性,具有长期记忆性和无周期的循环,如果参量在过去的一段时间内有增加的趋势,那么在将来的一段时间内也表现为增加的趋势,如果一段时间内呈现减弱的趋势那么将来一段时间也表现为减弱的趋势,且 $H$ 越接近于 $1$ ,持续性越强;当 $0 < H < 0.5$ 表明时间序列具有反持续性,过去的增加趋势意味着将来呈现减少的趋势,过去的减少趋势意味着将来呈现增加趋势,且 $H$ 越接近于 $0$ ,反持续性越强.

## 2 唐洞矿区沉陷监测应用与分析

### 2.1 数据来源

唐洞煤矿八一井位于湖南省资兴市三都矿区南部,西距市中心 $3\text{ km}$ ,北距三都镇 $7\text{ km}$ 交通较为方便.由于本采区位于矿井深部,大气降水及邻近采区充水的影响较小,采区内断裂较发育,经勘探和生产证明对采区沉陷危险源主要是具有压扭性质的抬轿垄断层和白石江断层,开采区上方工人村已经搬迁拆除.为了确保采区范围内建筑物、人员、近行车辆的安全,必须掌握塌陷区内地表沉降规律,成立监测课题组在矿区范围内布设了水准及GPS监测网点,其点网分布示意图1所示.

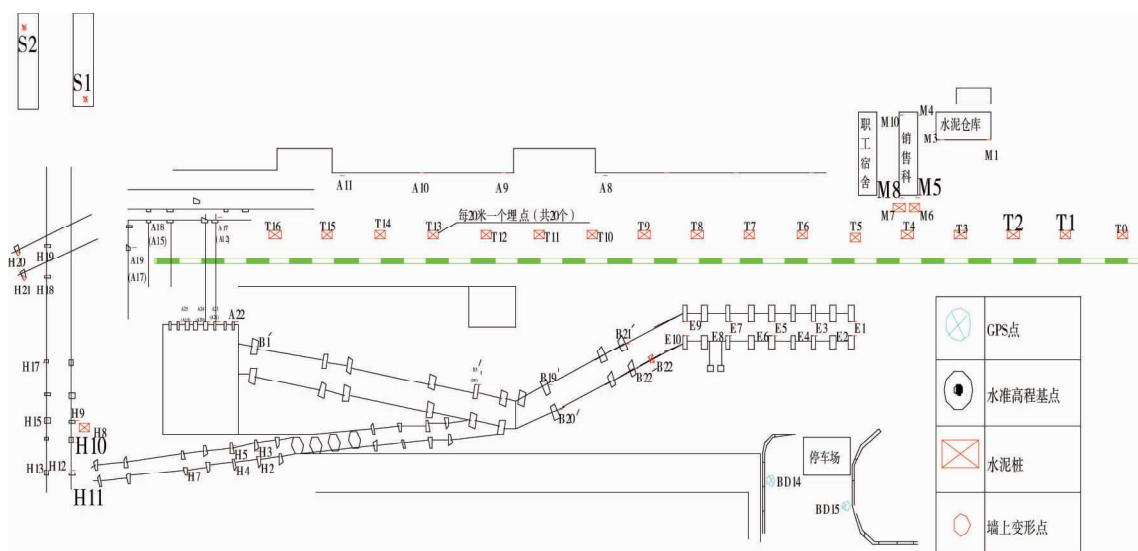


图1 变形监测点布设

### 2.2 矿区数据处理与分析

根据开采情况,选取开采区上方其中具有代表性的8个监测点作为研究点位,这8个监测点位分布矿区工人村、水库、铁路、矸石山及断层上方等重点监测部位,其中S1, S2为桥面监测点;T1, T2为铁路轨道监测点;M5, M8, H10, H11为建筑物监测点,这些部位在一定程度上代表整个矿区的沉降特征.监测时间跨度为2004~2016年,监测时间间隔为季度,以每个季度测得的累计沉降值作一时间序列,得到季度观察值样本为52个,其监测结果沉降曲线如图2所示, $Y(t)$ 为累计沉降量, $t$ 为观测期数.

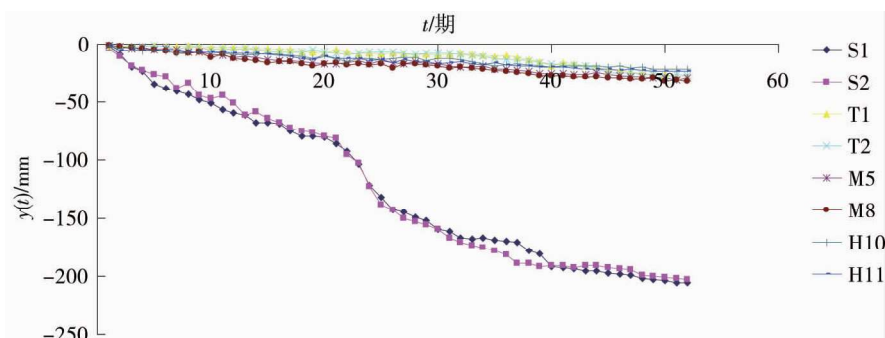


图2 变形监测点沉降曲线

将得到的8个监测点沉降变化时间序列进行分析,把累计沉降量  $Y(t)$  看作随机变量,即  $Y(t) \sim (t)$ ,  $t$  代表期数,即将时间序列分成了52个等间隔时间段.取前49期数据作为实验集,用作R/S分析,第50期至第52期的数据用作结论的检验.作为分别对各个监测点实验集数据进行分析,经计算,将所得到的一系列  $\ln(R/S)_M$  和  $\ln M$  在双对数坐标系中利用最小二乘法拟合,即可得到拟合直线的斜率(即Hurst指数).在利用最小二乘法拟合过程中,为了验证拟合效果,计算得到相关系数  $R^2$  和  $F$  统计量及对应的  $p$  值,具体见表1.

表1 监测点沉降变化时间序列的Hurst指数

点号	Hurst 指数	相关系数 $R^2$	$F$ 值	$p$ 值
S1	0.977 9	0.992 3	773.975 9	0
S2	0.974 0	0.996 6	1 770.477 0	0
T1	0.971 9	0.992 1	757.827 3	0
T2	0.940 7	0.982 9	345.532 4	0
M5	0.991 7	0.994 3	1 041.499 0	0
M8	0.975 1	0.997 0	2 016.996 0	0
H10	0.956 9	0.995 2	1 234.811 0	0
H11	0.894 9	0.987 9	488.104 8	0

相关系数用来反映变量之间相关关系密切程度的统计指标.相关系数的绝对值越大,相关性越强;相关系数  $R^2$  越接近于1或-1,相关度越强;相关系数越接近于0,相关度越弱. $F$  统计量用来检验模型整体的显著性,其对应的  $p$  值就是当原假设为真时所得到的样本观察结果或更极端结果出现的概率.表1中各自模型得到的  $p$  值均小于1%的显著性水平,所以接受原假设发生的概率小于1%,因此拒绝原假设,接受备择假设,模型显著.模型整体通过显著性检验,呈现线性.拟合结果见图3.

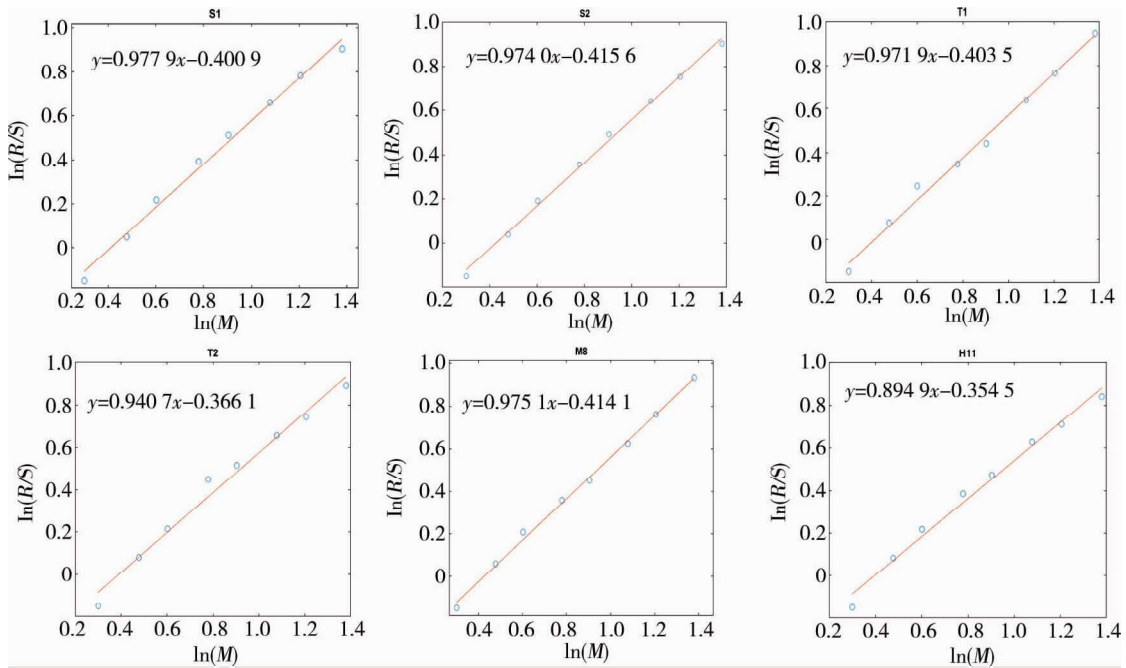


图3 各监测点沉降变化时间序列R/S分析拟合图

以上结果表明,采用最小二乘法进行线性拟合,各时间序列双对数图具有很好的线性关系,相关系数  $R^2$  最小为0.9829,线性回归方程通过相关系数检验和  $F$  检验,各测点拟合效果较好,计算结果可靠,Hurst指数可信度高.监测点位沉降序列的Hurst值区间位于[0.8949,0.9917],均大于0.5,根据Hurst指数的值域划分,Hurst指数大于0.5表明时间序列具有长期记忆性,各监测点位的变化趋势将跟历史趋势保持一致,从图1及表2中所有监测点方差在减小,可以判断所有的监测点的沉降变化趋势正在减弱,那么未来

所有监测点的沉降变化趋势也将会减弱;另外8个监测点的沉降变化趋势基本相同,说明影响矿区沉降的外部因素大致相同。

根据前文1.1节提到的Hurst指数越接近于1,持续性越强,意味着趋势性越强.从整个测区来说,所选所有监测点的沉降时间序列的Hurst指数均接近于1,所以它们的持续性均较强,说明趋势性越强;上段分析所选所有监测点沉降时间序列的沉降变化趋势为减弱,那么这些监测点位未来的沉降变形的减弱趋势将较强,意味着所有监测点位愈来愈趋向于平稳.根据研究所选取的监测点位分布来看,矿区工人村、水库、铁路、矸石山及断层上方以上等重点区域的沉降趋于平稳。

### 2.3 分析结论的检验

利用观测期中的第50期~第52期的共3期数据,作为验证集数据,对2.2节中分析结论进行检验.用8个监测点前49期和最后3期验证集的标准差进行比较,如果变小,则说明,监测点沉降变化的趋势在减弱.8个监测点的标准差如表2所示.从表2中可以看到8个监测点的验证集标准差在减少,说明验证集的沉降变化趋势在减弱;同时8个监测点的标准差同时在变小,说明它们的沉降趋势相同,验证了R/S分析的结论.从表2可以看到,8个监测点的验证集标准差接近于0,说明8个监测点的沉降趋于平稳,这与R/S分析结果一致。

表2 监测点的标准差

点号	前40期准差/mm	41~49期标准差/mm	验证集标准差/mm
S1	56.63	3.17	0.89
S2	61.40	3.18	0.67
T1	3.86	3.60	0.89
T1	3.77	3.44	0.67
M5	6.41	1.33	0.22
M8	6.82	0.93	0.22
H10	4.55	0.87	0.02
H11	4.85	0.98	0.01

## 3 结论

1) 矿区沉降趋势具有很强的非线性和较好的分形特征。

2) 由R/S分析法计算的Hurst指数可知,该矿区重点部位监测点沉降时间序列的Hurst指数均在区间(0.8,1)内,其值靠近于1,这表明现阶段矿区重点部位的沉降趋势具有持续性,即矿区重点区域的沉降趋势将持续减弱,且其减弱趋势较为明显。

3) R/S分形法可以有效地预测矿区沉降发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 谭志祥,邓喀中.综放面地表变形预计参数综合分析及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):1041-1047.
- [2] 刘树新,苏彦斌,韩兴华.不同采煤方法下开采沉陷的数值模拟研究[J].中国矿业,2015,24(12):89-93.
- [3] Chen S, Yin D, Cao F, et al. An overview of integrated surface subsidence-reducing technology in mining areas of China[J]. Natural Hazards, 2016,81(2):1129-1145.
- [4] Xiao W, Hu Z, Chugh Y P, et al. Dynamic subsidence simulation and topsoil removal strategy in high groundwater table and underground coal mining area: a case study in Shandong Province[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2014,28(4):250-263.
- [5] 龙四春,杨光锐,袁英,等.基于GIS与概率积分的矿山“三下”开采沉陷预测研究[J].工程勘察,2015,43(7):55-59.
- [6] Jung H C, Kim S W, Jung H S, et al. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis[J]. Engineering Geology, 2007,92(1):1-13.

- [7] 刘德元,孙新华,何盛东,等.大红山矿区开采沉陷预计的 MapGIS 方法[J].金属矿山,2016,45(9):157-160.
- [8] Xu H, Liu B, Fang Z. New grey prediction model and its application in forecasting land subsidence in coal mine[J]. Natural hazards, 2014,71(2):1181-1194.
- [9] Kim Y, Son M, Moon H K, et al. A study on the development of an artificial neural network model for the prediction of ground subsidence over abandoned mines in Korea[J]. Geosystem Engineering, 2017,20(3):163-171.
- [10] 连增增,谭志祥,李培琨,等.模糊关系方程法在矿山开采沉陷最大下沉值预测中的应用[J].金属矿山,2010,39(7):132-135.
- [11] 张社荣,韩启超,谭尧升,等.R/S法的土石坝施工期沉降规律及预警标准研究[J].中国安全科学学报,2012,22(8):164-170.
- [12] Zhongying Z, Yulin W, Guangdi L, et al. An rescaled range analysis on the characteristics of coal seam development in the Eastern depression of the Liaohe Basin[J]. Mining Science and Technology (China), 2011,21(2):223-227.
- [13] Szolgayova E, Laaha G, Blöschl G, et al. Factors influencing long range dependence in streamflow of European rivers[J]. Hydrological Processes, 2014,28(4):1573-1586.
- [14] Witt A, Malamud B D. Quantification of long-range persistence in geophysical time series: conventional and benchmark-based improvement techniques[J]. Surveys in Geophysics, 2013,34(5):541-651.
- [15] 李远耀,殷坤龙,程温鸣.R/S分析在滑坡变形趋势预测中的应用[J].岩土工程学报,2010,32(8):1291-1296.
- [16] 张殷钦,胡伟,刘俊民.基于R/S分析法的地下水位动态变化趋势分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(12):4912-4916.
- [17] He W P, Liu Q Q, Jiang Y D, et al. Comparison of performance between rescaled range analysis and rescaled variance analysis in detecting abrupt dynamic change[J]. Chinese Physics B, 2015,24(4):581-588.
- [18] Benoit B M, James H W. Robustness of the Rescaled Range R/S in the Measurement of Noncyclic Long Run Statistical Dependence[J]. Water Resources Research,1969,5(5):967-988.