

热水沉积过程混沌序列弱信号的提取

金友渔

(中国地质大学数学地质遥感地质研究所, 武汉 430074)

摘要: 运用地层垒积序列的概念和 Logistic 混沌序列叠加过程分解模型, 对岩比参数序列中的弱信号进行提取, 进一步研究热水沉积作用强度演化的定量特征, 为对热水沉积盆地古地理环境进行三维动态模拟奠定了基础。

关键词: Logistic 混沌序列; 叠加过程; 多变量时间序列; 弱信号; 热水沉积。

中图分类号: P628⁺.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)02-0172-04

作者简介: 金友渔, 男, 教授, 1942 年生, 1981 年毕业于武汉地质学院北京研究生部, 获数学地质专业硕士学位, 现从事矿床统计预测、地质时间空间序列定量分析、地质过程计算机模拟、地质学中非线性方法等方面的教学和研究工作。

1 热水沉积岩比序列强弱信号组成

在热水沉积岩比参数动态演化模拟^[1]中, 作者已对 ZK74-42 号孔中次深水盆地相段 3 元岩比参数垒积序列应用待定线性组合自回归过程分析获得 3 个动态演化因子(因子图见文献^[1])。

热水沉积作用与反映古地理环境的岩比参数间具有密切的相关性, 而 3 个动态演化因子反映了控制古地理环境演化及热水沉积演化的地质作用, ZK74-42 号孔中次深水盆地相段中 3 个动态演化因子的演化各具特点, 第二因子具有线性演化趋势, 可能与该区加里东海槽由沉降转为抬升的演化趋势以及次深水盆地逐渐向碳酸盐台地演变的总趋势有关, 第三因子反映了旋回周期的演化特征, 反映同沉积断裂活动、海底喷流热水沉积与正常海沉积的旋回周期的演化, 第二因子和第三因子是空间自相关很强的自回归过程(自相关系数分别为 0.988 和 0.814), 是强信号, 而第一因子空间自相关较弱(自相关系数为 0.713), 为被干扰的弱信号, 需要应用专门的弱信号提取方法对其进行分析。强信号第二因子和第三因子反映的是次深水盆地三角岩比相区的演变总特征, 而与同沉积断裂活动、海底喷流热水

沉积直接相关的信号可能被隐藏在第三因子的弱信号中。经地质分析认为, 该次深水盆地的海底喷流热水沉积与具有非线性动力学特征的同沉积断裂活动及所引起的海底碎屑流活动有密切关系。弱信号可能具有混沌动力学特征。

对 3 元岩比参数垒积序列的 3 个岩比参数分别求出对应的第一因子的因子得分垒积序列, 经对 3 个因子得分垒积序列分别应用 Logistic 序列分析, 均具有 Logistic 序列演化特征, 但更准确的分析必须同时使用 3 个因子得分垒积序列。以下按本文所述的方法进行分析。

2 Logistic 混沌序列叠加过程分解的数学模型

2.1 线性叠加过程的分解

设线性叠加过程为:

$$XC=Y, \quad (1)$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & \cdots & x_p(1) \\ \vdots & & \vdots \\ x_1(n) & \cdots & x_p(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

为 p 个相互独立的时间序列矩阵, 每一列为一个时间序列的 n 个样本, 每一行为 p 个时间序列的时刻 t 的 1 个样本。

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{p1} & \cdots & c_{pp} \end{bmatrix}$$

为线性叠加系数矩阵,每一列为一个线性叠加系数向量。

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(1) & \cdots & y_p(1) \\ \vdots & & \vdots \\ y_1(n) & \cdots & y_p(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{np} \end{bmatrix}$$

为由 p 个相互独立的时间序列 X 按阵 C 中不同列所表示的线性叠加系数向量线性叠加而成的 p 个时间序列矩阵,每一列为一个线性叠加过程的时间序列的 n 个样本,每一行为 p 个线性叠加过程的 p 个时间序列的时刻 t 的 1 个样本。

对于任一线性叠加过程 $y_j(t)$ 或 y_{ij} 可表为:

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^p c_{ij} x_i(t), \tag{2}$$

$$y_{ij} = \sum_{i=1}^p c_{ij} x_{i\dot{u}}. \tag{3}$$

若 X 阵表示的是 p 个相互独立的信号序列,则 Y 阵为由 p 个信号依 C 阵不同的 p 个线性叠加系数向量线性叠加而成的 p 个观测时间序列。

观测时间序列阵 Y 既然是由 p 个相互独立的信号序列阵 X 经线性叠加系数阵线性叠加而成,则 p 个观测时间序列是具有由 p 个因素以不同比例影响控制生成的具有成因联系的相关序列.由 Y 出发,将线性叠加过程分解,从而复原信号序列阵 X 的过程可由下式获得:

$$X = YB. \tag{4}$$

对于任一 $x_{ji}(t)$ 可由观测时间序列线性叠加而成,表达为:

$$x_{ji} = \sum_{i=1}^p b_{ij} y_i(t). \tag{5}$$

可见一定存在一个唯一的线性叠加系数阵 B ,信号序列阵 X 必是 Y 经阵 B 线性叠加而成,阵 B 即是 Y 的线性叠加系数矩阵 C 的逆阵,即 $B = C^{-1}$.

2.2 Logistic 混沌序列叠加过程分解的数学模型

Logistic 随机序列表达为:

$$x(t) = ax(t-1)[1-x(t-1)] + e(t), \tag{6}$$

$e(t)$ 为高斯白噪声过程. $a = 1 \sim 4$, 当 $a > 3.65$ 时 Logistic 随机序列表现为 Logistic 混沌随机序列^{[2~6]①}.

假设有 $p-1$ 个信号均为 Logistic 随机序列,其参数 a 及初值 $x(0)$ 均不相同,其中至少有一个信号为 Logistic 混沌随机序列, $p-1$ 个 Logistic 随机序列与另一个高斯白噪声过程构成 p 个信号时间序列阵 X , 这 p 个信号时间序列两两间互相独立,按 (1) 式线性叠加而成观测时间序列阵 Y .

在上述对信号类型的假设下,可以导出仅通过观测时间序列阵 Y 而求取线性叠加系数阵 B ,从而将观测时间序列阵 Y 进行分解以复原信号时间序列阵 X 的数学模型. 令:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t)]^T,$$

$$Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_p(t)]^T,$$

$$B_j = (b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{pj})^T,$$

$$E(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_p(t)]^T.$$

由 (5) 式,将被复原的第 j 个信号可表为 p 个观测时间序列以待定的 B 阵的第 j 列向量为线性叠加系数的线性叠加过程:

$$X_j(t) = B_j^T Y(t), \tag{7}$$

由 (6) 和 (7) 式得:

$$B_j^T Y(t) = a_j [B_j^T Y(t-1)] \cdot \{1 - [B_j^T Y(t-1)]\} + B_j^T E(t). \tag{8}$$

在二阶平稳假设下,将 (8) 式两边同乘以 $X_j(t) = B_j^T Y(t)$, 并求期望得:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} [B_j^T Y(t)]^2 = \\ & a_j \frac{1}{n-1} \left\{ \sum_{t=1}^{n-1} B_j^T Y(t-1) [B_j^T Y(t)] \right\} - \\ & a_j \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} [B_j^T Y(t-1)]^2 [B_j^T Y(t)] + \\ & \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} [B_j^T E(t)]^2. \end{aligned} \tag{9}$$

其中: $X_j(t) = B_j^T Y(t)$ 的方差记为 $(\sigma_{X_j})^2$, $E_j(t) = B_j^T E(t)$ 的方差记为 $(\sigma_{E_j})^2$, 观测时间序列 $Y(t)$ 的协方差阵记为 $\sum^{(0)}$, 一阶滞后自互协方差阵记为 $\sum^{(1)}$. 经整理, (9) 式变为用 Logistic 混沌随机序列拟合将被复原的第 j 个信号 $X_j(t)$ 的拟合度 Q_j 来表达:

$$Q_j = 1 - \frac{(\sigma_{E_j})^2}{(\sigma_{X_j})^2} = a_j \cdot$$

$$\frac{B_j^T \sum^{(1)} B_j - \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} [B_j^T Y(t-1)]^2 B_j^T Y(t)}{B_j^T \sum^{(0)} B_j}. \tag{10}$$

① Lee C, Williams D B. Generalized iterative methods for enhancing contaminated chaotic signals. IEEE Trans Circuits and Systems— I : Fundamental Theory and Applications, 1997.

显然,使 Q_j 达极大是所希望的.若 B_j 是符合上述原则下的解,则 $q_j B_j$ (q_j 为任意非零的常数)仍是符合上述原则下的解,不妨设 $B_j^T \sum^{(0)} B_j = 1$,因而使 Q_j 达极大的问题化为在 $B_j^T \sum^{(0)} B_j = 1$ 的条件下的极值问题.

设:

$$f(B_j) =$$

$$a_j \left\{ B_j^T \sum^{(1)} B_j - \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} [B_j^T Y(t-1)]^2 B_j^T Y(t) \right\} - \lambda [B_j^T \sum^{(0)} B_j - 1],$$

令: $\partial f(B_j) / \partial B_j = 0$, 得到

$$a_j \sum^{(1)} B_j - a_j \cdot$$

$$\begin{bmatrix} B_j^T \{Y(t-1)[Y(t)]^T y_1(t-1) + Y(t-1)[Y(t-1)]^T y_1(t)\} \\ B_j^T \{Y(t-1)[Y(t)]^T y_2(t-1) + Y(t-1)[Y(t-1)]^T y_2(t)\} \\ \dots \\ B_j^T \{Y(t-1)[Y(t)]^T y_p(t-1) + Y(t-1)[Y(t-1)]^T y_p(t)\} \end{bmatrix}.$$

$$B_j - \lambda \sum^{(0)} B_j = 0.$$

上式两边除以 a_j , 并仍以 λ 表示 λ/a_j , 且用 $\sum^{(\Delta)}$ 表达上式右边第二项中的 p 行 p 列矩阵, 得:

$$\sum \cdot B_j = \lambda \cdot B_j, \tag{11}$$

其中: $\sum = [\sum^{(0)}]^{-1} [\sum^{(1)} - \sum^{(\Delta)}]$.

(11) 式仅与观测时间序列 $Y(t)$ 和待定的 B 阵的第 j 列向量有关, 它提供了将观测时间序列阵 Y 进行分解以复原信号时间序列阵 X 的数学模型.

3 热水沉积过程 Logistic 混沌序列弱信号的提取方法

对 3 元岩比参数垒积序列的 3 个岩比参数分别求出对应的第一因子的因子得分垒积序列, 形成 3 元因子得分垒积序列, 作为(10)式中观测时间序列 $Y(t)$ 的输入^[7], 按(11)式将观测时间序列阵 Y 进行分解以将弱信号复原出信号类型及参数特征, 结果如表 1 和图 1 所示. 由于单变量方法的缺陷, 分别对每元岩比参数垒积序列求出对应的第一因子的因子得分垒积序列所作的分析只能提取出如表 1 中的非混沌的 Logistic 序列, 而应用本文的方法则可有效地提取出被干扰的弱信号具有 Logistic 混沌序列的特征.

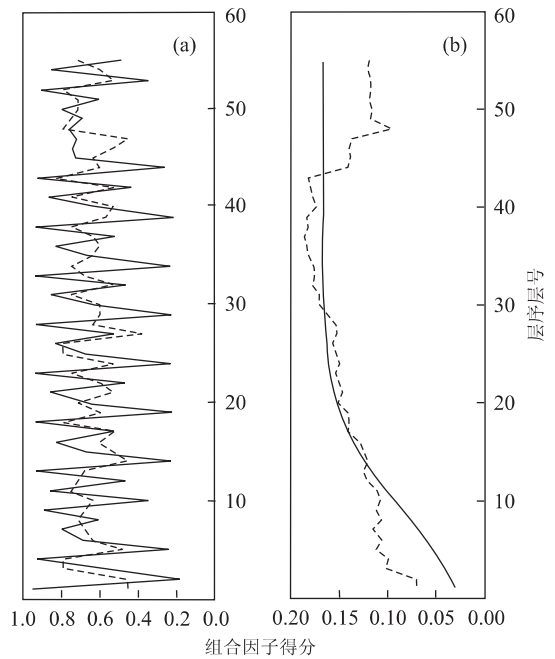


图 1 ZK74-42 孔热水沉积中的 Logistic 序列

Fig. 1 Logistic series in hydrothermal sedimentation in the borehole ZK74-42

a. 混沌序列; b. 非混沌序列; 虚曲线为实际序列; 实曲线为模拟序列

表 1 热水沉积过程 Logistic 序列特征

Table 1 Parameters of Logisitic series in hydrothermal sedimentation

Logistic 序列号	序列类型	参数特征	
		系数 a	初值 $x(0)$
1	混沌	3.76	0.95
2	非混沌	1.20	0.03

4 结论

(1) 研究区的 ZK74-42 号孔中次深水盆地相段中 3 个动态演化因子的演化各具特点, 强信号的第二因子和第三因子反映的是次深水盆地三角岩比相区的演变总特征, 而与同沉积断裂活动、海底喷流热水沉积直接相关的信号被隐藏在第三因子的弱信号中. 经对弱信号分析提取发现了具有非线性动力学特征的 Logistic 混沌序列, 与地质分析认为的该次深水盆地的海底喷流热水沉积与具有非线性动力学特征的同沉积断裂活动及所引起的海底碎屑流活动有密切关系, 弱信号可能与具有混沌动力学特征的推论相吻合. 强信号的第二因子和第三因子, 特别是第三因子对钻孔间的喷流热水沉积组段进行对比有指导作用, 而喷流热水沉积组段中热水沉积层

段的对比则通过各吸引子特征的分布得到信号提示。(2) 本文所提出的方法对具 Logistic 混沌序列的弱信号分析提取具有较好的效果。(有关吸引子特征及对比的研究将另文发表)。

参考文献:

- [1] 金友渔. 热水沉积岩比参数动态演化模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(2): 179~184.
- [2] Schweizer S M. TLS parameter estimation for filtering chaotic time series [A]. Proc ICASSP'96 [C]. [s. l.]: [s. n.], 1996. 1609~1612.
- [3] Drake D F. Minimum mean square error estimation for a class of chaotic systems [A]. Proc ICASSP'96 [C]. [s. l.]: [s. n.], 1996. 2960~2963.
- [4] Papadopoulos H C, Womell G W. Maximum-likelihood estimation of a class of chaotic signals [J]. IEEE Trans Information Theory, 1995, 41(1): 312~317.
- [5] Schreiber T, Kantz H. Noise in chaotic data: diagnosis and treatment [J]. Chaos, 1995, (1): 133~142.
- [6] Jin Y Y. The ALCAR model and decomposition of overlapping process [A]. 3rd International Conference on Signal Processing [C]. New York: Publishing House Electronics Industry, 1996. 40~43.
- [7] 楼顺天, 李博菡. 基于 Matlab 的系统分析与设计——信号处理[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 1998. 36~236.

EXTRACTION OF WEAK SIGNAL OF CHAOTIC SERIES ON HYDROTHERMAL SEDIMENTATION

Jin Youyu

(Institute of Mathematical Geology and Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The concept of stratigraphic pile-up sequences and decomposition model of overlapping process of Logistic chaotic series are applied to extract the weak signal for the sequence of lithologic ratio parameters, which has established the basis for dynamic modeling of three dimensions in the paleogeographic environment of hydrothermal sedimentary basin.

Key words: Logistic chaotic series; overlapping process; multiple-variable time series; weak signal; hydrothermal sedimentation.