

测井数据滑动窗关联维计算和沉积学分析

余继峰¹, 李增学¹, 刘 华², 王玉林², 孙厚敏¹

YU Ji-feng¹, LI Zeng-xue¹, LIU Hua², WANG Yu-lin², SUN Hou-min¹

1. 山东科技大学地球信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510;

2. 胜利油田公司地质科学研究院, 山东 东营 257015

1. *School of Earth Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong, China;*

2. *Institute of Geological Sciences, Shengli Petroleum Administration, Dongying 257015, Shandong, China*

摘要: 应用滑动窗关联维计算方法对鲁北济阳坳陷某钻井剖面石炭系—二叠系陆表海沉积层段GR测井响应数据进行了分形维数计算, 结果表明海侵体系域关联维数一般较小, 且维数曲线振荡变化较弱, 而高水位体系域则相反。这与海侵体系域形成时海平面上升的主控因素压制或掩盖了其他因素的显现有关, 同时也证明测井序列分形分析能从另一个新的视角观察识别测井序列中所包含的地质信息。随着分形方法应用研究的不断开展, 必将从测井数据中挖掘出更多的有用信息, 指导油气等资源勘探与开发, 丰富及完善测井地质学理论。相信将来分形会成为地质数据分析的标准工具。

关键词: 测井数据; 滑动窗关联维; 体系域

中图分类号: P618.13; P628; P512.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-2552(2006)09~10-1211-04

Yu J F, Li Z X, Liu H, Wang Y L, Sun H M. Calculation of the sliding window correlation dimension of well logs and its sedimentary implication. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(9-10):1211-1214

Abstract: The fractal dimension of the gamma-ray (RG) log of the Permo-Carboniferous epicontinental sedimentary interval of a well in the Jiyang depression was calculated by using the sliding window correlation dimension method. The results show that: the fractal dimension of the transgressive systems tract (TST) is generally small with a weak fluctuation but the reverse is true for the highstand systems tract (HST), which is because the overwhelming controlling factor of sea-level rise concealed or suppressed other factors during the formation of the TST. Meanwhile, this also demonstrates that the geological information contained in well logs could be recognized or achieved with the fractal method from a new angle. With the ongoing applied research on the fractal method, much more useful geological information will be extracted from well logs, which may be used to guide exploration and exploitation of oil-gas etc. and enrich and improve the well-log geology. The authors believe that in the future the fractal method will become a standard tool in the analysis of geologic data.

Key words: well logs; sliding-window correlation dimension; systems tract

分形几何学是20世纪70年代由法国数学家B.B.Mandelbort创立的, 是一门研究自然界中常见的不规则形体的表现及其内在规律的非线性科学。由于其研究对象的广泛性, 目前正日益深入于自然科学与社会科学各领域中。沉积盆地是一个复杂的非线性的动力系统, 沉积地层则是这个系统随时

间演化轨迹的一个不完全的记录, 而沉积序列中包含了多个不同层次的沉积旋回, 沉积旋回中又包含有多个不同层次的沉积韵律, 从而形成一个多层次的嵌套结构——分形集^[1]。测井数据作为对沉积地层的一种直接测量数据, 自然蕴涵了沉积地层的分形信息, 利用分形理论可以对其中的非均质性、

收稿日期: 2006-02-06; 修订日期: 2006-05-24

基金项目: 国家“973”项目子课题《多种能源矿产共存富集形式及地球物理识别标志》(编号: 2003CB214608)和《多种能源矿产共存富集地质条件综合评价与预测》(编号: 2003CB214608)资助。

作者简介: 余继峰(1964-), 男, 博士, 副教授, 从事盆地沉积学、测井地质学研究。E-mail: yujifeng05@163.com

突变性、差异性和间断性事件进行分析。地球在发展历史中经过了漫长地质年代的非线性、非均质性的多次地质作用,地下岩石的物性、孔隙度、渗透率等的分布表现出很强的非均质性和各向异性,所有这些特征都适合于用分形技术研究,从而为分形理论提供了应用前提和应用的可行性。分维数是分形理论中的定量指标,它从一个新的视角定量地描述研究对象或系统的复杂性。通过深度扫描求取测井序列的分形维数,用于定量解释测井数据所蕴藏的地质信息是非线性科学应用于地质学领域的一个很有前途的发展方向,这方面的研究成果还相当少。测井取样密度能小到0.125 m一个采样点,长达几百米的测井段共有几千个样本点,可实现研究尺度从几十厘米到上百米的重复取样,满足分形分析的需要^[2]。

1 滑动窗关联维计算

对测井曲线的分维计算,常用的方法不外乎这样几种:关联维法、变尺度分析法(R/S分析法)、变异函数分析法、功率谱分析法。本文将用关联维法加以研究。

关联维数表征数据序列之间的关联程度,Grassberger和Procaccia根据嵌入理论和重建相空间的思想,提出了从时间序列直接计算关联维数的算法(简称G-P算法),假定在实验中测得一个数据时间序列 $\{x_i\}, i=1, \dots, n$,其中 $x_i=x(t_i)$,将时间序列 $\{x_i\}$ 重新排列,构造一个E维的向量相空间 $|X_i|$,其中 $X_i=(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}), i=1, \dots, N; N=n-m+1$ 。

任意2个向量之差的绝对值 $r_{ij}=|X_i-X_j|$ 为向量 X_i 与 X_j 的距离。任意给定一个正数 ε ,检查有多少点对间的距离 $r_{ij}<\varepsilon$,其数目记为 $N_1(\varepsilon)$,把 $r_{ij}>\varepsilon$ 的点对的数目记为 $N_2(\varepsilon)$,则点对总数 $N(\varepsilon)=N_1(\varepsilon)+N_2(\varepsilon)$ 。将距离 $r_{ij}<\varepsilon$ 的点对在所有点对中所占的比例记为 $C(\varepsilon)$,即 $C(\varepsilon)=N_1(\varepsilon)/N(\varepsilon)$,并适当调整 ε 的取值大小,则可能在一段 ε 区间内有 $C(\varepsilon)=\varepsilon^D$,其中指数 D 是一种维数。关联维数相应的定义为:

$$D=\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$$

其中 $C(\varepsilon)$ 有如下的形式:

$$C(\varepsilon)=\frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \theta(\varepsilon - |x_i - x_j|)$$

$$=\frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \theta(\varepsilon - r_{ij})$$

$$\text{当 } \varepsilon - r_{ij} \geq 0 \text{ 时, } \theta(\varepsilon - r_{ij}) = 1$$

$$\text{当 } \varepsilon - r_{ij} < 0 \text{ 时, } \theta(\varepsilon - r_{ij}) = 0$$

当把 N 换为 ω 时($\omega < N$),公式变为:

$$C(r, s) = \frac{1}{\omega^2} \sum_{i,j=1+s-\omega/2}^{s+\omega/2} \theta\{r - (x_{i+\omega} - x_{j+\omega})\}$$

ω 便叫做滑动窗,也可以看做是对 N 个数中的 ω 个数进行关联维计算, s 为滑动步长,即滑动窗口每次向下滑动的步长,依次上移或者下移窗口,计算整个井段的分维。

本次研究采用了Prokoph^[3]的滑动窗关联维计算程序。该

程序要求数据文件必须是纯文本文件,数据的格式也必须是2列:深度列和测井响应数值列,即如下所示形式(某钻井的AC参数):

深度/m	AC
1809.125	0.459
1809.25	0.47
1809.375	0.479
1809.5	0.468
1809.625	0.451
1809.75	0.431
1809.875	0.407

为消除量纲的影响,同时方便程序所需参数(最大、最小半径)的选择,更好地反映数据的变化趋势,首先对测井数据进行归一化处理,即:

$$V_i = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}$$

原始的测井数据文件一般有3000~4000个数据,由于程序处理个数的限制,需要对每个文件进行分割,分割为若干程序要求的子文件分别计算:

- ①input-file name:hac1.txt(要处理的输入文件)
- ②out-putfile name:hac1f.txt(处理后数据的输出文件)
- ③minimum radius <data range around mean value/amplitude>? 0.001(最小半径)
- ④maximum radius:0.85(最大半径)
- ⑤time lag? 1(时间滞后量)
- ⑥stepwise of analyze window move? 1(滑动窗的移动步长)
- ⑦data number/window:32(滑动窗口的大小)

经分形程序计算后的数据,格式为纯文本格式。其成果数据的结构形式为:

深度/m	E2	E3	E4	E5
1811.5	1.4007	1.69426	1.93556	2.28118
1811.62	1.4075	1.67431	1.91574	2.28118
1811.75	1.4244	1.71429	1.92553	2.30524
1811.88	1.4285	1.75255	1.9611	2.32835
1812	1.4333	1.7612	2.01457	2.37417
深度/m	E6	E7	E8	E9
1811.5	2.83682	3.1806	2.13157	2.75749
1811.62	2.83682	3.1806	2.13157	2.75749
1811.75	2.83682	3.1806	2.13157	2.75749
1811.88	2.89386	3.1496	2.04226	2.63958
1812	2.94745	3.14958	1.94718	2.51139

2 应用实例

本文对济阳坳陷某钻井GR测井数据进行关联维计算。计算时一般要求测井数据必须是平稳的,不平稳的测井数据会引起分维估计的偏差。但只要测井地质层位分层合理,一般能满足平稳性条件^[4]。钻井剖面的层序地层划分方案按经

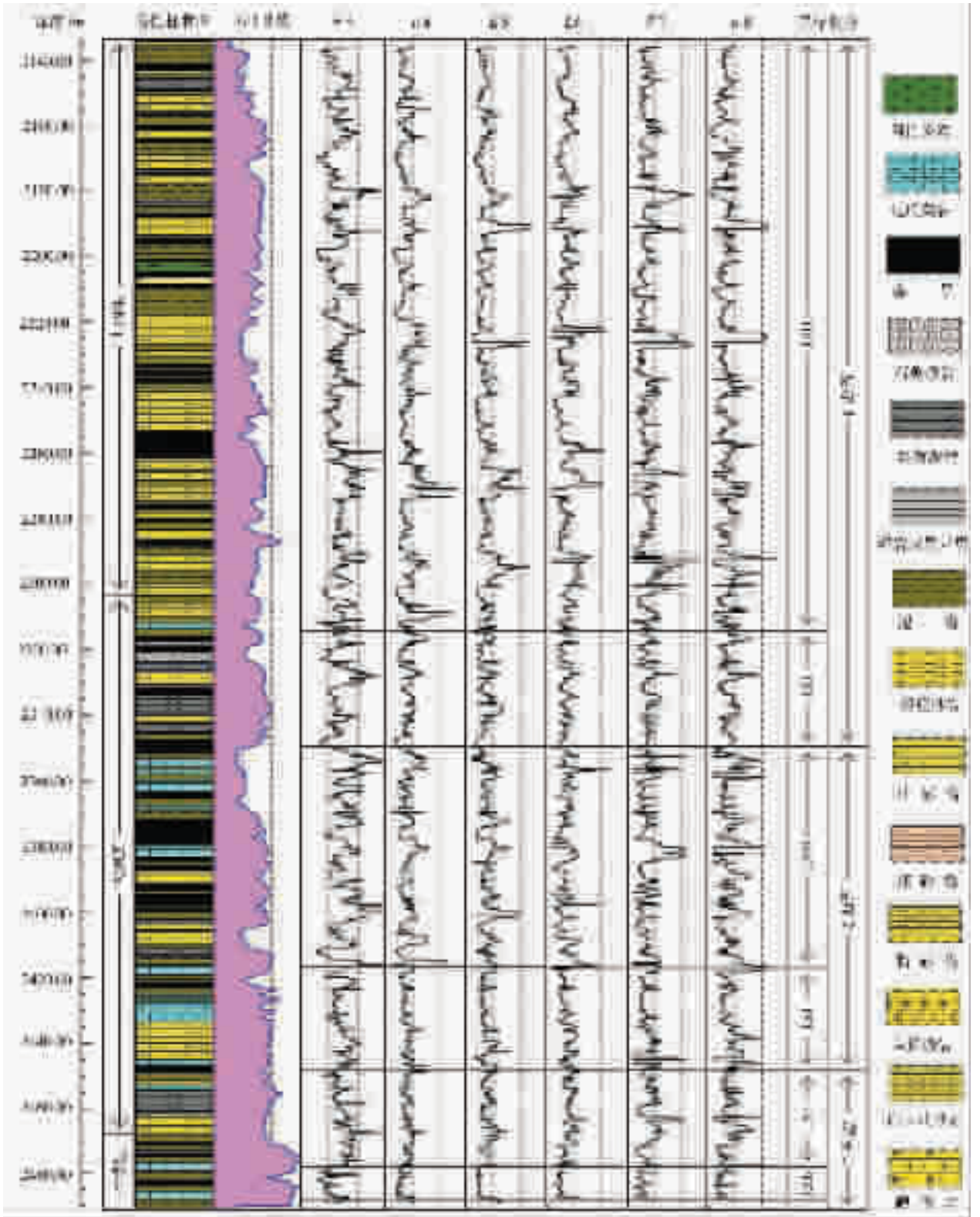


图1 济阳拗陷某钻井上古生界GR测井响应的关联维数变化与体系域的关系

Fig.1 Relationship between system tracts and fractal correlation dimension variation of GR well logs of the Upper Paleozoic in a well in the Jiyang depression
E3—嵌入相空间维数为3时的关联维数;TST—海侵体系域;HST—高水位体系域

典层序地层分析方法和小波变换方法进行^[5-9]。下面仅利用关联维曲线对层序中体系域的发育特征加以分析,并对其形成背景和机制的复杂性给予解释。本次计算,重构相空间(嵌入相空间)维数取 $E=3,4,5,6,7,8$,结果见图1。

从理论上讲,测井曲线的关联维反映的是地层沉积时水动力条件和沉积环境变化的急剧程度和关联程度,当然也包括一些其他因素,如所选的曲线对沉积环境的敏感程度、构造背景、成岩后期地质作用等。一般情况下,沉积环境比较稳定,也就是沉积环境变化小和相对深水稳定的动力条件,沉积地层相对均匀,则响应的测井相相对集中,关联维数值较小,分维数的变化也不剧烈;反之,沉积环境变化剧烈,也就是沉积环境变化大和水深相对变浅,水动力条件多变的沉积地层,响应的测井相相对分散,此时有相对较大的分维数^[7]。总之,分维数代表了沉积环境变化和影响因素的相对多少,即沉积背景的复杂程度。由图1可看出,在层序或体系域的分界处一般均有分维数突变的现象,说明通过分维数的变化可以将地层堆积序列中可能存在的间断或突变区域探测出来;同时发现海侵体系域中关联维的变化一般较微弱,而高水位体系域中关联维的变化较剧烈,说明海侵体系域形成背景的复杂性或影响因素较高水位体系域形成背景的复杂性低,或影响因素偏少。原因可能是海侵体系域以海平面的上升为影响沉积物堆积的主控因素,而其他因素的影响因主控因素的掩盖而表现得相对不明显;但对高水位体系域来说,海平面的上升达到最大值后,虽然仍有升降振动,但不再显示出其主控地位,使得其他因素的影响得以表现,如物源供应变化、沉积物再分配等自旋回机制的影响,在层序3中这种表现尤为突出。从关联维局部极大值随重构相空间维数的增大而趋于饱和的趋势判断,影响沉积充填序列的因素一般为7个,特别是高位体系域,局部为6个或8个。关联维趋于饱和和稳定的判断标准是不再增大(甚至减少)或急增。

3 结论

将测井序列看成一时间序列进行关联维计算,关联维曲线表明,海侵体系域关联维数一般较小,且维数曲线振荡

变化较弱,而高水位体系域则相反,这与海侵体系域形成时海平面上升的主控因素压制或掩盖了其他因素的显现有关,从关联维突变极值点随重构相空间维数增大而趋于饱和而判断出的原始相空间维数方面分析,结论是一致的。

测井序列分形分析能从另一个角度观察识别测井序列中所包含的大量信息,即测井数据通过不同的分形方法处理后,获得了更多的新信息。而且一般是隐藏在直观信号背后不易直接观察到的信息。这些信息所透露出的深层次的含义也许还没有完全看清楚,正像某些学者坦言,分形是具有巨大潜能但大部分却未被证实的一种技术^[8]。笔者认为,随着研究的不断深入,运用分形方法能从测井数据中挖掘出更多的有用信息,指导油气等资源的勘探与开发,丰富及完善测井地质学理论。相信将来分形会成为地质数据分析的标准工具^[9]。

参考文献:

- [1]曾锦光,舒雅琴,钟勇.地球物理资料预测油气的分形方法[J].物探化探计算技术,1994,16(4):345-352.
- [2]伍增贵,栾志安.井间地层分形描述[J].石油大学学报(自然科学版),1999,23(5):45-49.
- [3]Prokoph A. Fractal, multifractal and sliding window correlation dimension analysis of sedimentary time series[J]. Computers & Geosciences, 1999, 25:1009-1021.
- [4]毛宁波.测井数据分维计算及其应用条件研究[J].地球物理学进展,2000,15(1):70-77.
- [5]王明镇,李增学,余继峰.鲁西-济阳石炭二叠系层序地层对比[J].煤田地质与勘探,2003,31(5):1-3.
- [6]余继峰,李增学,王明镇,等.山东晚古生代陆表海沉积测井层序对比分析[J].中国科技论文在线优秀论文,2005-10-25.
- [7]欧阳健,王贵文,吴继余,等.测井地质分析与油气定量评价[M].北京:石油工业出版社,1999.15-22.
- [8]Roy E Plotnick, Karen L Prestegard. Fractal and multifractal models and methods in stratigraphy[A]. In: Christopher C Barton, Paul R La Pointe eds. Fractals in petroleum and earth sciences[M]. New York: Plenum Press, 1995.73-96.