

用最大熵谱分析进行等时沉积序列 的相关性对比

王多云 陈应泰 刘文彬

(中国科学院兰州地质研究所)

黄钢 郑承光

(长庆油田勘探开发研究院)

提要 本文以鄂尔多斯盆地东部镇川堡含气区的下二叠统下石盒子组为例, 提出对等时沉积序列进行最大熵谱分析的方法, 以便寻找各地层序列间的历史成因联系和彼此间的亲疏程度, 从而较好地解决了诸如古水流方向、河道形态及湖泊岸线位置等问题。研究表明, 镇川堡含气区下石盒子组沉积物来自东北付谷、宝德一带, 古水流方向北东 30—60°, 发育两个河流系统, 稳定主河道 4 条。下石盒子组地层序列最大熵谱分析的最佳滤波阶数 $m=62$, 谱跨度 K 的最佳参数为 200。

关键词 最大熵谱分析 等时沉积序列 二叠系 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 王多云 男 34 岁 助理研究员 沉积学

引 言

以沉积相模式为指导的剖面相分析侧重岩性组合和沉积构造序列, 其实质是从小的时空尺度上阐明形成沉积记录的作用力和成因机理, 进而重塑沉积环境。这种属于动力沉积学范畴的岩相分析法, 往往针对单个地层序列的环境分析。而历史沉积学, 则侧重从较大的时空尺度上阐明各个沉积记录的垂向序列特征以及有关沉积现象在时间上的发展、演化和空间上的展布、配置规律, 即要寻找沉积序列在时空演化过程中的历史联系。在油气勘探区, 在缺乏地表剖面而井下取芯数量又不可能太多的情况下, 利用大量的录井岩性剖面进行探区岩相古地理重塑, 进而确定沉积体系, 古水流方向, 河道形态及海(湖)岸线位置等是必需的基础工作之一, 特别是在构造稳定, 沉积环境单调而探区面积又相对较小的大型盆地目标层序中, 这些问题的研究有一定难度。首先是如何在每个录井岩性剖面中确定彼此等时的顶底界线(具年代地层学意义的沉积层序界线), 而非生产上应用的岩石地层单位界线; 其次是如何进行它们之间的相关性对比, 即研究彼此间的历史成因联系和亲疏关系, 从而解决有关沉积学问题。前者可用合成地震记录与地震反射剖面等时界面(反射同相轴)对比与追踪闭合的地震地层学方法解决, 而后者无疑属于历史沉积学的研究方法问题。

本文以鄂尔多斯盆地东部镇川堡地区下二叠统下石盒子组陆相沉积层序为例, 探讨用最大熵谱分析方法进行多个等时沉积序列间相关性对比的原理和方法。

一、最大熵谱分析的地质意义

自然界中复杂的周期运动, 都由多个不同频率的简单周期运动叠加而成, 例如声波、光波及地震波等。在沉积学中, 所谓沉积旋回也是某种沉积事件的周期性重复, 一套具有成因联系的地层序列是在一定时间尺度内 (从早到晚) 形成的物质记录, 因此, 某一沉积事件周期性出现的频繁程度, 可用时间序列中的频率术语来表达。同时, 某一沉积现象, 也可用定量数据标定, 例如, 沉积环境下河道层序在垂向上的周期性发育, 可用代表河道沉积的砂岩厚度得出一组时间序列数据; 潮湿气候条件下海陆交互成煤环境中周期性的海水进退旋回, 可用代表海退期滨岸沼泽炭质泥岩、煤岩或者海进期的泥灰岩、微晶灰岩等在序列中出现的频度 (次数) 和强度 (沉积物厚度) 来表达等等。即使某种沉积特征 (岩性, 厚度, 矿物、生物群落及其分异度等现象) 在序列中看来似乎是随机的或杂乱无章的重复出现, 其实也包含着隐藏的周期性或似周期性。谱分析就是利用数学方法, 把时间序列中不同频率的周期运动逐步分离出来, 并找出其主要周期。最大熵谱分析属谱分析的一种, 与其他的谱分析方法 (例如功率谱, 傅立叶谱和周期图法等) 比较, 该方法具有不受取样长度限制, 对频谱分辨率较高等优点。

最大熵谱简称 MEM (Maximum Entropy Matrix), 一个不确定性随机过程的 MEM 谱值 $P(f)$ 由下式确定:

$$P(f) = P_m \Delta t \left| 1 - \sum_{n=1}^m A_{mn} e^{-2\pi i f n \Delta t} \right|^{-2} \quad (1)$$

式中: P_m 是第 m 个点的预测误差滤波器的输出功率。

A_{mn} 是预测误差滤波器的系数。

m 是预测误差滤波器的阶数, 即滤波窗口的大小。在 MEM 分析计算中, m 的选择十分重要。 m 选择过小, 即阶数过低, 导致主要的谱峰分辨不出来, 而 m 过大, 即阶数过高, 又会引起谱峰的分裂。

最佳预测误差滤波器的阶数 m 可由下式确定:

$$(FPE) m = \left((1+m/n) / (1-m/n) \right) \times P_m \quad (2)$$

式中: P_m 是 m 的输出功率, n 为采样个数, m 是选定的预测误差滤波器的阶数。

在谱分析计算过程中, 可给出不同的 m 值, 求出不同的 P_m 值, 再将一系列 P_m 值代入式 (2), 可以求出一系列不同的 FPE 值。从这一系列 FPE 值中选取最大值, 相对应的 m 值即为最佳的预测误差滤波器的阶数。

在陆相盆地中, 河流-湖泊 (沼泽) 沉积体系构成了沉积环境的基本框架。在陆相盆地演化过程中, 随着构造、气候等外部条件和水域面积、地形地貌等内部条件的改变, 在空间上表现为冲积作用和湖泊 (沼泽) 作用两种主要环境的互为消长, 在时间上形成两大类沉积物的交错叠复。这一基本特征, 在湖盆发育中期表现的尤为明显, 地层剖面一般为单调的砂泥互层结构。在湖泊岸线上方的高能冲积区, 砂泥岩互层则是河道 (砾岩、砂岩及粉砂岩) 与河道间平原、沼泽及河漫湖泊 (泥岩、粉砂质泥岩、煤层等) 交替出现并旋回性堆积的产

物. 因此, 在等时沉积序列中, 砂砾岩段在序列中出现的次数反映了河道在一定时间尺度内在该部位发育的频度, 即序列中砂岩层出现的次数越多, 则意味着河道在该部位出现的频率越高; 每个砂岩层的厚度则反映了河道在发育时持续的时间长短, 即砂岩越厚, 则意味着当时河道所堆积的时间越长. 某个沉积序列中砂岩层数的多少及其与泥岩层的叠复型式, 可以认为是河道以不同周期、不同频率在该部位旋回性地出现所造成的, 这样, 根据对砂岩层在序列中出现频度的 MEM 分析, 可以把河道在该部位旋回性发育的主周期分离出来, 即求出河道以旋回性方式出现时的主频率, 对在平面上分布的每个沉积序列 (彼此间必须等时) 均经过 MEM 分析后, 可以确定它们各自在彼此等量的时间尺度内河道发育的主周期 (其倒数为主频率). 凡是主频率相近的序列, 则意味着它们是在同一河流系统中, 受相似的水动力条件制约时所产生的序列, 由此可以达到确定不同等时沉积序列间成因联系及其亲疏程度的目的, 进而研究古水系网络、水流方向、河道位置以及古湖泊岸线位置等问题.

图 1 是 Y6 井 P_{1x} 层序的岩性序列 (A), 砂砾岩类厚度时间序列 (B) 和最大熵谱分析的谱图 (C). B 中时间序列的采样间隔为 0.4m, 滤波阶数 (m) 经反复试算后确定的最佳值为 62, 谱跨度 (K) 的最佳值是 200. 该序列的最大谱密度值 (5.09) 所对应的砂岩在序列中出现的主周期为 10.95m, 反映了河道砂岩在序列中出现的主频率特征. 即在 Y6 井的 P_{1x} 序列中, 河道 (砂岩) 在该序列中主要是以 10.95m 的高周期出现的. 虽然可以根据图 1 中的谱图 (C) 确定出砂岩出现的二级周期或者其他更次级的周期, 但 10.95m 这一主周期, 便定量地反映了河道在该部位发育的最基本规律. 这一定量统计数据, 就为该序列同其他与之等时的序列进行相关性对比进而确定它们的成因联系和亲疏程度提供了依据. 如果某一序列的砂岩发育主周期与该序列的主周期 (10.95m) 相同或相近, 则认为它们二者有某种成因上的联系或者沉积环境上的相似性.

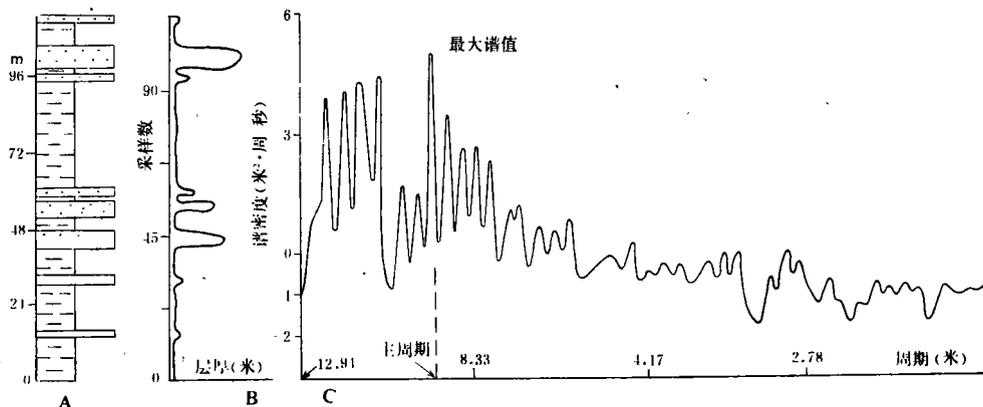


图 1 Y6 井 P_{1x} 地层序列 (A), 砂岩出现的波形图 (B) 和熵谱图 (C)

Fig. 1 P_{1x} Sedimentary sequences (A), the sandstone time series (B) and the entropy matrix map (C) of the Well Y6.

对 P_{1x} 层序 28 个等时沉积序列分析后得出每个序列的最大谱密度值 (MPS) 与其对应主频率 (FAC, 其倒数为主周期) 的分布图 (图 2).

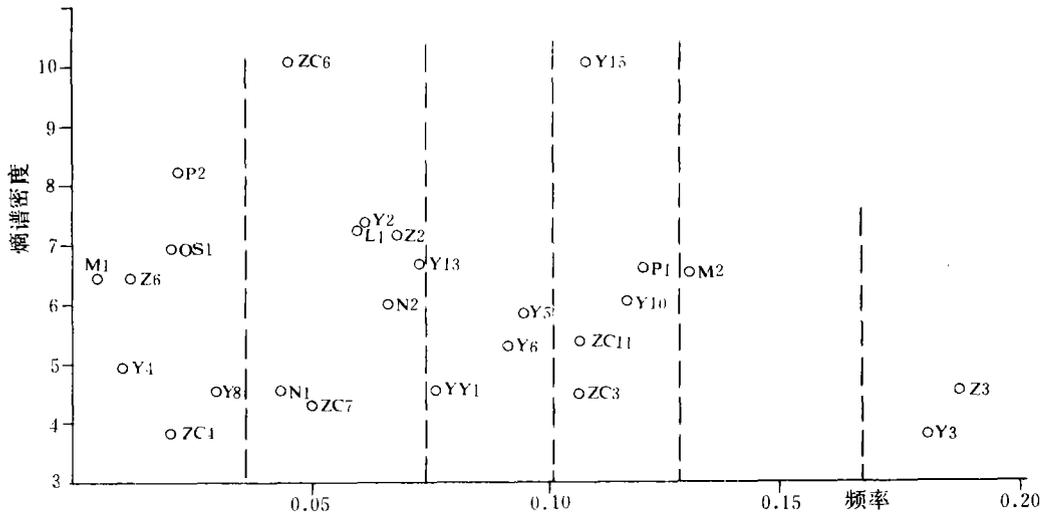


图2 28个等时 P_{1x} 序列的最大熵谱值与其对应的频率分布图

Fig. 2 Distribution map of MEM value and the corresponding frequency from 28 isotime sequences

显而易见, 如果某个地质特征在两个等时的地层序列中均有出现, 且有相似的频度 (快慢、时间持续长短) 和幅度 (含量、厚度、大小等等), 则这两个地层序列显然有某种历史联系, 或者有极其相似的成因条件, 因此, 图 2 反映了沉积序列间相互关系的重要信息:

1. 随着主频率值的增大 (横轴方向), 表明砂岩类岩石在序列中出现的频率越高, 周期间隔越短, 决定砂岩成因的环境在序列中越来越占主导地位.

2. 随着最大谱密度值的增加 (纵轴方向), 表明砂岩类岩石在序列中形成时, 决定其成因的环境所持续的时间增加 (该岩石厚度增加).

3. 同一频率分带内的序列, 在成因上有联系. 要么在同一沉积体系中形成, 要么在相同的环境下产生. 同一频率分带内的谱密度值变化, 或是反映了沉积序列在同一沉积体系中的不同位置 (同一沉积环境的不同亚环境、沉积水体能量在流向上的变化等) 或是反映形成该沉积物堆积时加积时间的长短.

4. 两个频率分带相隔愈远, 则意味着处自所包含的沉积序列在成因上联系越差, 甚至是不同沉积体系中的产物; 反之, 两个频带相隔愈近, 则成因联系愈强.

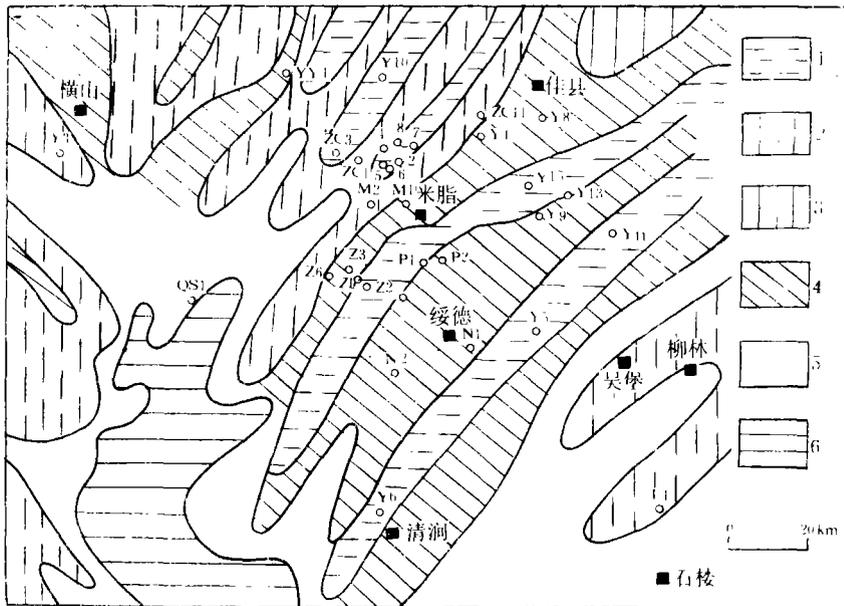
5. 不同频率分带中的序列, 如果处于同一谱密度值范围, 则可能具有相同环境相的意义, 只是它们在成因上的联系不同罢了, 即某些沉积序列, 即使不处于同一沉积水流体系中, 但它们的形成环境是相似的.

总之, 可用最大熵谱分析研究等时沉积序列的成因联系.

二、应用与效果

鄂尔多斯盆地东部镇川堡地区下二叠统下石盒子组 (P_{1x}) 为一套陆相沉积层序. 区域

地质背景资料表明,当时,鄂尔多斯盆地在靖边以北地区,均为单调的冲积沉积环境,沉积岩性只有河道砂岩和河道间泥岩、砂质泥岩两类,地层序列表现为单调的砂泥岩互层结构。如前所述,反映高能水流沉积的砂岩(包括砾岩、砂质砾岩等)在序列中的分布,可以认为是不同周期的、持续时间长短不等的河道在时间方向上的叠加混合,经最大熵谱分析(图1)分离出的砂岩层在序列中重复性出现的主周期则反映了河道在垂向上发育的定量特征。根据图2的地质意义,同一水流体系的河道在垂向演化上的主周期相近,推而广之,不同水系中河道、河道间的岸后沉积物以及河流体系与湖泊体系沉积序列间的差异,可用河道砂岩在序列中重复性出现的主周期(主频率)的不同而区别开来。因此,应用图2反映的各沉积序列间的成因联系和亲疏关系并根据其平面组合,可恢复 P_{1x} 层序的河道分布面貌(图3)。



1.较稳定河道 2.非稳定河道 3.河漫湖泊 4.河道间平原 5.河泛平原 6.洪泛盆地

图3 镇川堡地区 P_{1x} 层序河道分布解释图

Fig. 3 Interpreted diagram illustrating the channel distribution of P_{1x} sequences

图3表明,该区 P_{1x} 层序沉积序列在平面上的成因组合有4种类型:

组合1 位于两河道间或两河流体系之间的河道间平原序列组合,典型组合是 Y8—Y4—M1—Z6; Y9—P2—N2 等。

组合2 属河流与泛滥盆地之间的河泛平原组合, QS1 即属此类。

组合3 非稳定河道序列组合, ZC8—ZC4; ZC7—ZC2—ZC5; L1 等可作为典型例子。

组合4 较稳定河道序列组合: 有 Y15—P1—Z2—Z3; Y10—ZC3; Y11—Y5—Y6 及 ZC6—ZC1 等。

根据以上4种等时沉积序列间的组合类型,镇川堡地区下二叠统下石盒子组 (P_{1x}) 的

岩相古地理面貌有以下特征:

1. 以 Y8, Y4, M1 和 Z6 井为界, 将该区分割成两个互不影响的河流系统. 该组合的各序列, 以泥岩组合为主, 砂岩分布的主频率均低于 0.03, 表明该带在 P_{1x} 期以河道间平原环境为主.

2. 在佳县、米脂一线 (Y8—Y4—M1—Z6 组合带) 的东南部, 发育 Y15—P1 和 Y5—Y6 两条主河道, 砂岩分布的主频率均高于 0.08, 表明河道环境在这两个带上占优势.

3. 在佳县、米脂一线的西北部, 发育的两条稳定主河道分别是 Y10—ZC3 和 ZC7—ZC6, 前者各序列的河道砂岩分布主频为 0.04—0.08, 后者为 0.10—0.13, 如此高频率和短周期叠复的河道砂岩, 正好构成了镇川堡地气田的主要储气层.

4. YY1 井是该区北东向水系与南北向水系的分界. QS1 井序列的砂岩分布不同于其东部和西部的岩性序列, 由此推断该位置兼受北东向水系和北西向水系的影响, 其砂岩在序列中分布的低频、长周期特征表明是 P_{1x} 期湖泊古岸线的大致位置.

5. 沉积序列组合的分布方向标志着沉积时古水流方向. Y11—Y5—Y6 井主河道方向为北东 45° , Y15—Z3 井主河道方向为北东 60° 左右. 物源方向指向古吕梁隆起西侧的宝德一带.

三、结 语

谱分析中的最大熵谱分析法可用于等时沉积序列间的相关性对比, 从而确定它们彼此间的历史成因联系. 该方法在油气勘探区利用录井岩性剖面重塑岩相古地理有实用价值.

沉积序列相关性对比的前提是序列顶底界线的等时性.

鄂尔多斯盆地东部镇川堡地区下二叠统下石盒子层序发育两个河流系统, 河道延伸方向为北东 30° — 60° , 4 条河道应为该区主要的油气储集带.

下石盒子组地层序列最大熵谱分析在最佳滤波阶数 $m=62$, 谱跨度 $K=200$ 时研究效果最佳.

收稿日期: 1991 年 8 月 13 日

参 考 文 献

- (1) 中国科学院地质研究所, 1977, 数学地质引论, 地质出版社, 196—231 页.
- (2) W. 斯瓦尔扎克著, 徐桂荣译, 1984, 沉积模型和定量地层学, 地质出版社, 116—135 页.

Determining Relativity of Isochronous Sedimentary Sequences with Maximum Entropy Matrix Analysis

Wang Duoyun Cheng Yingtai Liu Wenbin

(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences)

Huang Gang Zheng Chengguang

(Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield)

Abstract

The ultimate aim of historical sedimentology is to expound characteristics of vertical sequences of the sedimentary records from larger time-space scale and explain its evolution process in time and the distributary pattern in space. That is, historical connection of the sedimentary sequences in time-space evolution would be interpreted. Maximum Entropy Matrix (MEM) analysis in Mathematics plays an important role on this object.

It is very clear that the fundamental principle taking the isochronous sedimentary sequences, which have a obvious characteristic of sandstone and mudstone interbed structure, to be undergone MEM analysis. That is, sandstone sediments of channel deposition which arise random or disorderly and unsystematically at the sequence contains actually the cyclicity of sub-cyclicity, and it reflects the periodicity of the channel evolution at the time vector. Thus, we can separate the main periodicity (main frequency) of the cyclicity sandstone with MEM analysis and take it as a parameter to determine the relativity of isochronous sedimentary sequences. If the two isochronous sedimentary sequences have the same or similar amount of main frequency of the channel sandstone arising, the sequences are of relativity in contribution factor of similarity in sedimentary environment.

This paper takes Zhenchuanpu gas-bearing area in the east of Eerduosi Basin locates in western North-China Platform as an example, and put forwards the MEM analysis method to the isochronous sedimentary sequences so as to look for the historical forming relationship in every stratigraphic sequences and the close relationship. Thus the paper has relatively well resolved the problems of palaeocurrent direction, the form of river channel and the shoreline of lake etc. The study shows that the MEM analysis method of stratigraphic sequences may help petroleum geologists to rebuild lithofacies and palaeogeography using lithic logging sectiones.

The study results indicate that the sedimentary provenance of the lower Shihezi Formation of lower Permian System in Zhenchuanpu area is along the northeastern Baode-Fugu, the palaeocurrent direction is 30° - 60° , and there are two river systems and three stable main channels.

When in the optimum fitting wave stage $m = 62$ and spectrum span $k = 200$, it is optimum to the MEM analysis effect of the stratigraphic sequences of the lower Shihezi Formation. The premise of the relativity correlation of sedimentary sequences is the isochronous character about the boundary of sequences top and bottom. Seismic stratigraphy may satisfactorily resolve this question.