

# 熵分析在单井相划分中的应用

张小莉

(西北大学地质系, 西安 710069)

熵作为随机过程中一种不确定性程度的量度, 广泛应用在地质学领域。本文应用马尔柯夫链的熵分析方法, 分析了邓1-邓5井不同层位地层的系统熵及其各种岩性的前熵、后熵, 并推测了各层位可能的沉积相。

关键词 熵 沉积相 转移概率矩阵

作者简介 张小莉 女 28岁 讲师 石油地质

## 0 前言

测井分析中, 通过对单井测井曲线作有序量最优分割处理, 再经因子分析、聚类分析形成一系列的测井相。测井相通过模式判别的方法, 由区域性的岩-电关系库, 转换成相应的岩性状态。各岩性状态之间有序组合形成该井的连续剖面。该剖面较钻井录井剖面、取心剖面具岩性深度准确、岩性不混层、剖面系统完整等优点。

应用马尔柯夫链的熵分析方法, 研究各岩性状态及其之间的组合关系可以分析各个层位的岩性旋回, 推测其相应的沉积环境, 进而为油气的生储盖评价提供有利依据。本文正是应用熵分析的方法, 以济源拗陷后邓构造邓1-邓5井测井解释岩性剖面为例, 分析了5口井各层位的岩性旋回及沉积环境。

## 1 济源拗陷区域地质特征

济源拗陷是华北盆地西南端的一个中新生界沉积盆地, 凹陷内沉积的地层有三叠系、侏罗-白垩系及第三系, 主要岩性有砾岩、砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩、泥岩等, 该拗陷内后邓构造中邓1-邓5井钻遇以上地层, 且钻井取心总进尺485m, 岩心总长427.9m, 平均收获率92%, 可见取心井段长, 收获率高, 以岩心为准, 进行岩电转换形成的单井剖面系统、连续且质量可靠。

## 2 马尔柯夫链的熵分析

### 2.1 马尔柯夫链的转移概率矩阵

#### 2.1.1 马尔柯夫链的数学模型

一组地层中沉积的若干岩性称为状态。在实际地层岩性分析中, 岩性状态构成一个有限的集合  $(a_1, a_2, \dots, a_m)$ , 设某一地层剖面  $T_0, T_1, T_2$  时刻岩性状态分别为  $a_x, a_y, a_z$ , 其中  $x, y, z \in (1, 2, \dots, m)$ , 如地层按时间  $T_0, T_1, T_2$  由下向上沉积, 那么由地质学理论可知,  $T_2$  时刻沉积的岩性  $a_x$  只与前一层的  $a_y$  有关, 而与更前的  $a_z$  无关, 这一理论正是马尔柯夫链的数学基础。

#### 2.1.2 转移概率矩阵

马尔柯夫链为一种随机过程, 应用一阶马尔柯夫链可知, 假如时刻  $T_n$  地层处于状态  $a_i$ , 到  $T_{n+1}$  时刻地层转移到状态  $a_j$  的概率为:

$$p\{T_{n+1} = a_j | T_n = a_i\} = p_{ij}$$

那么从任一状态出发, 经过一次转移后, 必出现该系统中的所有状态的一个, 故有  $\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, m)$ , 其中包括系统停留原状态的概率  $p_{ii}$ , 由于  $p_{ij}$  是概率事件, 因此,  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ 。

应用马尔柯夫链分析岩性转移的核心为建立转移概率矩阵。转移概率矩阵常应用统计方法求得, 即对于一地层剖面, 统计不同岩性岩层之间转移频数矩阵(记为  $G$ ), 该矩阵中对线元素为  $O$ 。从  $G$  可求得

向上转移概率矩阵:  $p_{ij} = G_{ij} / N_{i \cdot}$ , 向下转移概率矩阵:  $q_{ij} = G_{ij} / N_{\cdot j}$ , 式中  $G_{ij}$  为转移频数矩阵  $G$  的元素,  $N_{i \cdot}$ 、 $N_{\cdot j}$  分别为转移频数矩阵  $G$  之行和、列和。

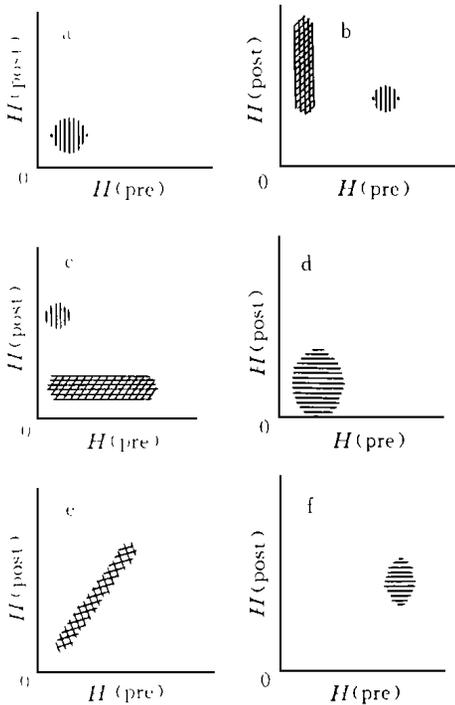


图 1 6 种模式的前熵、后熵关系图

a. 理想的非对称旋回; b. 上部缺失的非对称旋回; c. 下部缺失的非对称旋回; d. 由旋回单元形成的一般非对称旋回; e. 由旋回单元形成的对称旋回; f. 强烈混乱的旋回

2. 1. 3 多步转移概率矩阵

切普曼-柯尔莫哥洛夫方程为利用  $P$  来计算从状态  $i$  经过  $k$  步转移到状态  $j$  的新转移概率矩阵的公式:

$$P_{ij}^k = \sum_{r=1}^k P_{ir}^n P_{rj}^{k-n} (1 \leq n \leq k)$$

它表示了从状态  $i$  经过  $k$  步转移到状态  $j$  的概率转移过程。即先从  $i$  经过  $n$  步转移到  $r$  ( $r = 1, 2, \dots, k$ ), 再由状态  $r$  经  $(k - n)$  步转移到状态  $j$ , 显然有  $P_2 = P^2$ , 同理  $P_k = P^k$ 。

当  $r$  不断增大时,  $P$  中各行向量趋于一致, 这一行向量为不变向量或固定向量, 它反映了各岩性在地层剖面中所占的百分比, 称为极限概率。极限概率为

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_{ij}^k = p_j(\text{const})$$

2. 2 马尔柯夫链的熵分析

熵是作为一种不确定性程度的量度而提出的, Isamu Hattori 提出了用前熵值和后熵值来研究沉积旋回的 6 种旋回模式(如图 1 所示), 其中:

$$\text{前熵: } H(\text{pre})[i] = - \sum_{j=1}^m q_{ji} \log_2 q_{ji}$$

$$\text{后熵: } H(\text{post})[i] = - \sum_{j=1}^m p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

结合马尔柯夫链的实际意义, 有下列几种性质:

(1) 后熵

A: 若  $H(\text{post})[i] = 0$ , 则转移概率矩阵  $p_{ij}$  中之一为 1 (即其他一切都是 0), 这表明状态  $i$  行使着一种确定性影响或控制于它的后继状态的选择, 即状态  $i$  要为一确定的状态从上边所代替。

B: 若  $H(\text{post})[i]$  较大, 表明状态  $i$  有记忆力是不清楚的, 要有较多的状态可以继承其后。

C: 若  $H(\text{post})[i]$  较小, 表明状态  $i$  有记忆力, 且这种记忆力随  $H(\text{post})[i]$  减小而增加。

(2) 前熵

A: 若  $H(\text{pre})[i] = 0$ , 即状态  $i$  要为一确定状态从下边代替。

B: 若  $H(\text{pre})[i]$  较大, 状态  $i$  出现较多地独立于它前边的岩性。

C: 若  $H(\text{pre})[i]$  较小, 状态  $i$  的出现较少地独立于它前边的岩性。

综合考虑  $H(\text{post})[i]$  和  $H(\text{pre})[i]$ , 则知它们适宜于作为描述状态  $i$  出现以后和出现以前相邻接的岩性指标, 有以下几种性质: 若  $H(\text{pre})[i] > H(\text{post})[i]$ , 说明状态  $i$  的继后岩性状态比状态  $i$  的居前岩性的出现有更大的确定性。相反, 若  $H(\text{post})[i] > H(\text{pre})[i]$ , 则状态  $i$  对它的居前岩性依赖性较状态  $i$  影响于其继后岩性的能力强。

另外, 一般用系统熵  $H(\text{sys})$  来研究岩性状态的沉积过程。

$$H(\text{sys}) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mathcal{Y}_{ij} \log_2 \mathcal{Y}_{ij}$$

$$\text{其中: } \mathcal{Y}_{ij} = G_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_{ij}$$

系统熵的大小反映地层序列中岩石组合变化的关系。前人根据系统熵值的大小及其状态数目, 绘出了岩相序列的沉积环境与熵的关系图(图 2), 此图件同样适用于陆相环境(景毅等, 1986)。

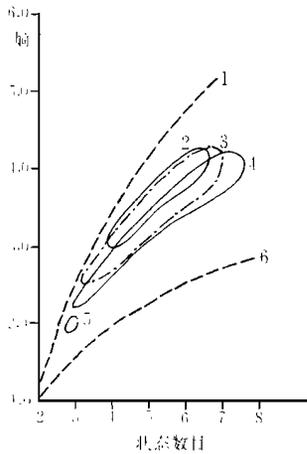


图2 岩相序列的沉积环境与熵关系图

1. 最大熵; 2. 煤测量继承的熵; 3. 河流冲积继承的熵;  
4. 浅海继承的熵; 5. 复理层沉积的熵; 6. 最小熵

### 3 应用熵分析研究单井沉积相

#### 3.1 单井相划分

我们对邓1-邓5井不同层位的各个岩性状态及其相应熵、系统熵进行了求取,并根据 $H(post)$ 和 $H(pre)$ 的大小作出其相应的熵关系图(图3)。

不同层位各种岩性的极限概率反映出其在剖面中出现的程度,邓1-邓5井各层位地层岩性的极限概率如表1所示。根据不同层位地层各岩性极限概率、前、后熵关系图及岩性序列沉积环境与熵关系图,推测出5口井不同层位可能的主要沉积相。其中第三系沙河街组二段地层以河泛平原相为主,沙河街组三-四段以河泛平原相或河道沉积为主,孔店组地层以河泛平原相为主,侏罗-白垩系地层以湖泊扇三角洲相为主,而三叠纪晚期则以滨浅湖相为主。地质分析结果表明有利的生油岩系分布在三叠系地层中,与熵分析结果基本相符。

#### 3.2 应用效果分析

通过马尔柯夫链的熵分析,可推出可能的沉积相类型,邓1井830~1200m井段地层,熵分析结果

表1 邓1-邓5井各层位岩性极限概率

井号	层位	井段(m)	泥岩	粉砂质泥岩	砂质泥岩	泥质粉砂岩	粉砂岩	细砂岩	小砾岩	灰质砂岩	备注
	N	180~347.5	0.0035				0.50000	0.3333	0.0833		
邓1井	E <sub>s</sub> <sup>2</sup>	347.5~534.7	0.4513	0.0615		0.0180	0.2871	0.1615			灰质泥岩 0.0205
	E <sub>s</sub> <sup>3+4</sup>	534.7~832	0.4509	0.0196	0.0196		0.3726	0.1177			灰质粉砂岩 0.0196
		832~1200	0.4820	0.0120			0.0241	0.4819			
邓2井	E <sub>s</sub> <sup>2</sup>	230~583	0.4635	0.0271		0.0066	0.4605	0.0356			页岩 0.0066
	E <sub>s</sub> <sup>3+4</sup>	583~930	0.3904	0.0412	0.0427	0.0514	0.2368	0.2375			
		930~1127	0.4876					0.4877			
邓3井	E <sub>s</sub> <sup>2</sup>	180~627	0.4951	0.0194			0.4370	0.0291		0.0097	砾状砂岩 0.0097
	E <sub>s</sub> <sup>3+4</sup>	627~1560	0.4757	0.0105	0.0035	0.0140	0.4719	0.0245			
邓4井	E <sub>s</sub> <sup>2</sup>	220~470	0.4326		0.0769		0.0270	0.3630	0.1004		
	E <sub>s</sub> <sup>3+4</sup>	470~1680	0.3655	0.1273		0.0375	0.4014	0.0606	0.0076		
		E <sub>k</sub>	1680~2200	0.4260	0.2692			0.3048			
邓5井	E <sub>s</sub> <sup>2</sup>	505~1139.5	0.4576	0.0678		0.0424	0.3390			0.0932	
	E <sub>s</sub> <sup>3+4</sup>	1139.5~1814	0.4796	0.1507		0.1165	0.2189	0.0343			
井	E <sub>k</sub>	1814~2005	0.4635	0.0244		0.3902	0.0975		0.0244		
	J-K	2005~2682	0.4274	0.0323		0.0403	0.1210	0.0807		0.1936	灰质泥岩 0.0800
	T	2682~3481.82	0.4314	0.0303		0.0458	0.3258	0.0229		0.0872	碳质泥岩 0.0365

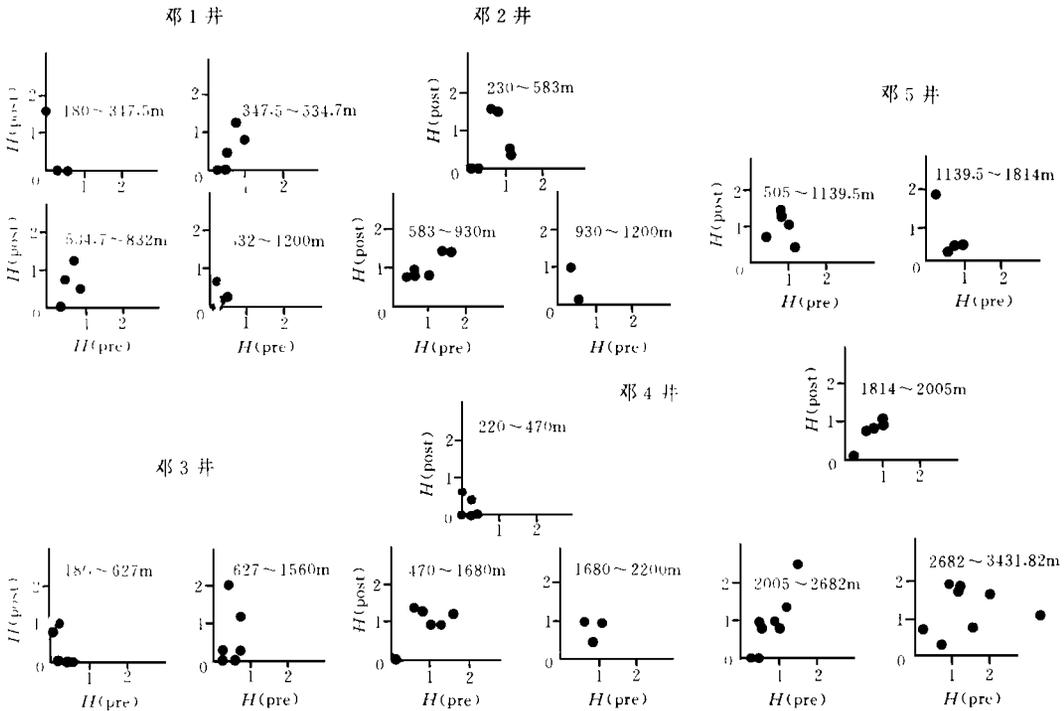


图 3 邓 1- 邓 5 井各层位的熵关系图

旋回模式为 A-2 型, 系统熵大小和状态数关系反映为河流冲积继承熵的范围, 剖面中砂岩、粉砂岩、泥岩的极限概率分别为 0.4819、0.0241、0.4820, 判定为河道充填沉积为主。该井段中岩心取样作粒度分析, 粒度参数和粒度概率曲线的三段式特征(图 4a), 反映出应为河道充填沉积类型。另外, 该井段 830~840m 井段中, 地层倾角测井矢量图中的绿-

红-蓝模式及自然伽马、自然电位曲线的箱状特征(图 4b、c), 均反映出河道充填沉积的特征。由此可见, 地质分析、测井曲线和熵分析结果之间可以互相印证; 其他井段及邓 2- 邓 5 井各层位分析结果对比如表 2 所示, 熵分析结果与地质划分基本吻合。那么应用熵分析方法, 具有快速、准确的特点, 可以为油气的勘探、开发提供一些有利的相带。

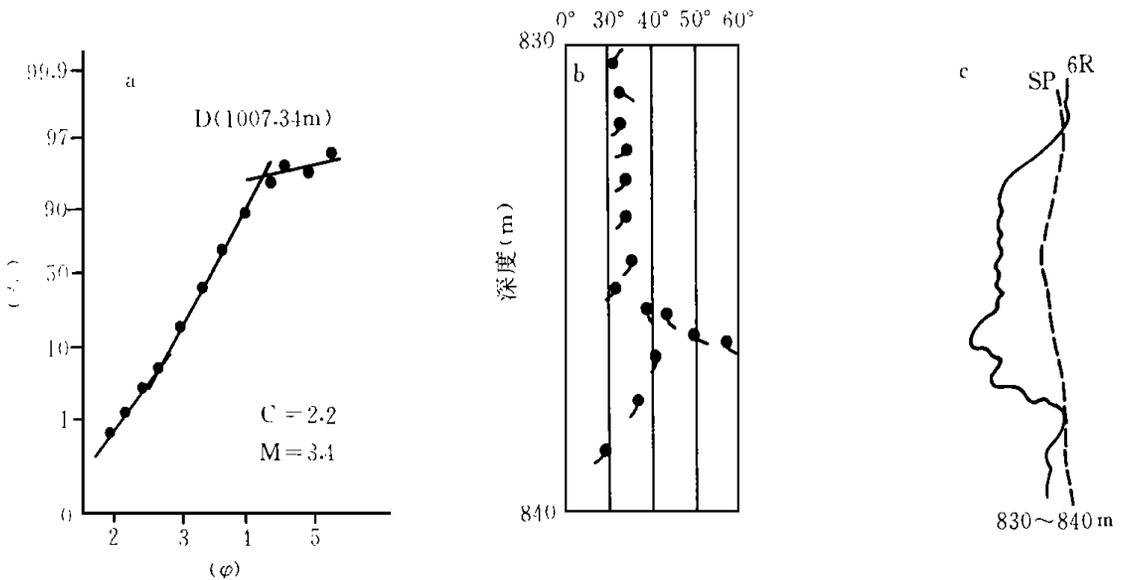


图 4 邓 1 井粒度概率曲线、矢量图及自然电位曲线特征

表2 邓1-邓5井熵分析结果与地质分析结果对比表

井号	层位	井段 (m)	旋回模式	状态数	系统熵	熵分析沉积相	地质分析	
							相	亚相
邓1井	Es <sup>2</sup>	347.5~534.7	A-4	6	2.7825	河泛平原	河	泛滥平原
	Es <sup>3+4</sup>	534.7~832	A-4	6	2.5237	河泛平原		
		832~1200	A-2	4	2.4807	河道充填沉积	流	河道
邓2井	Es <sup>2</sup>	230~583	A-4	6	2.8976	河泛平原	河	泛滥平原
	Es <sup>3+4</sup>	583~930	C	6	3.3480	河泛平原		
		930~1127	A-2	3	2.3300	河道充填沉积	流	河道
邓3井	Es <sup>2</sup>	180~627δ	A-3	6	2.8433	洪积	洪积	扇中
	Es <sup>3+4</sup>	627~1560	A-2	6	2.6408	河道充填沉积	河流	河道
	Es <sup>2</sup>	220~470	A-3	5	2.1460	河泛平原		泛滥平原
邓4井	Es <sup>3+4</sup>	470~1680	C	6	3.0362	河泛平原	河	泛滥平原 夹含废弃河道
							流	
	Ek	1680~2200	A-4	3	2.3968	河泛平原		泛滥平原
邓5井	Es <sup>2</sup>	505~1139.5	A-2	5	2.8688	河道充填沉积		河道
	Es <sup>3+4</sup>	1139.5~1814	A-3	5	2.9965	河泛平原	河	泛滥平原
	Ek	1814~2005	B	5	2.6259	河泛平原	流	泛滥平原 夹含决口扇
	J-K	2005~2682	B	8	2.9399	湖泊扇三角洲	湖	扇三角洲
	T	2682~3481.82	A-4	7	3.2818	滨浅湖	泊	滨浅湖

## 参 考 文 献

- 1 景毅,王世称等.马尔柯夫过程在地质学中的应用.北京:地质出版社,1986:34~75

(收稿日期:1997年6月26日)

## THE APPLICATION OF ENTROPY ANALYSIS TECHNIQUE ON SINGLE- WELL FACIES DIVISION

Zhang Xiaoli

(Northwest University, Xian 710069)

### Abstract

Entropy is a non-definability measurement in a random process and it is applied to the role of geology. In this paper, Entropy analysis in Markov chains was applied to analysis the system entropy and lithic pre-entropy, post-entropy in every stratohorizon in Deng 1 to Deng 5 well, and then guessed every stratohorizon probability sedimentary facies.