

煤层显微序列数学模拟及其在煤储层物性评价中初步应用^①

张有生 秦勇 陈家良

(中国矿业大学资源与环境学院 江苏徐州 221008)

摘要 应用马尔柯夫过程的原理和方法,建立起描述煤层形成过程或显微序列的数学模式,进而通过对研究实例中煤层结构以及煤岩分层孔比表面积的模式拟合,可以模拟出各种显微煤岩类型在煤层中的分布部位以及煤层中煤层甲烷的有利储存部位,对厚煤层物性和储气性能的非均质性特征作出预测,为煤层气开采地质条件评价提供了一条新的思路。

关键词 马尔柯夫过程 煤层显微序列 模式 煤储层物性 孔比表面积

第一作者简介 张有生 男 32岁 讲师 从事煤、油气地质与勘探的教学与科研

对于煤层气而言,煤层既是气源岩,又是储集层。煤层系由各种不同的煤岩分层在垂向上叠置而成,必然造成煤层物质组成以及物理性质的高度非均质性,进而对煤储层的孔隙性、渗透性、吸附/解吸性等开采地质条件产生影响。然而,在传统的煤储层评价中,往往是把煤层作为均一的整体加以考虑,忽视了对煤层非均质性的考察,在很大程度上导致了评价结果的不确定性和盲目性。为此,本文作者应用马尔柯夫过程的原理和方法,力图建立起对煤层垂向结构及其影响之下的物性非均质性进行定量描述的数学模式和地质模式,为煤层物性非均质性评价探索一条新的有效途径。

1 理论依据及方法

如果随机过程 $\{X(t), t \in T\}$ 对于任意 n 个 $t_1, t_2 \dots t_n \in T$ 且 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$,满足 $P\{X(t_n) \leq X_n \mid X(t_{n-1}) = X_{n-1} \dots, X(t_1) = X_1\} = P\{X(t_n) \leq X_n \mid X(t_{n-1}) = X_{n-1}\}$ 则称该随机过程 $X(t)$ 为马尔柯夫过程(Markov)。其特点为:在已知 t_{n-1} 时刻状态条件下, t_n 时刻的状态仅与 t_{n-1} 时刻的状态有关,而与 t_{n-1} 时刻以前的状态无关,其实质是无后效性^[1, 2]。

煤层形成过程受到成煤植物、气候、沼泽介质、沼泽基底沉降等地质因素的影响,导致煤岩条带的垂向叠置具有一定的随机性。同时,各种影响因素

的变化又是渐变的(有时是突变的),致使相邻煤层之间又具有成因联系,后一分层与前一分层之间的成因联系最为密切。因此,煤层的形成过程与马尔柯夫过程具有相似性,可用马尔柯夫过程的原理和方法进行描述。

一般情况下,采用马尔柯夫链模拟地层序列时,往往把地层序列中的不同岩性的岩层转化为马氏过程中的状态^[2, 3]。煤层中显微煤岩类型厚度较小,在宏观状态下无法区分,故有必要采用特殊的转化方法。首先按光泽岩石类型将煤层分成不同厚度的分层,然后由下往上按0.3 mm的点距对各分层的显微煤岩类型进行统计^[4]。

本文对内蒙准格尔煤田主煤层——晚石炭世太原组6号煤层进行了设例研究。采样点处煤层厚14.75 m,按光泽类型分成15个煤分层,逐层采取连续定向样品,制备块煤光片。从底板往顶板方向,逐层逐样统计显微煤岩类型。为了便于数据的计算机处理,将七种基本煤岩类型和一种富矿物类型用阿拉伯代码加以表示(表1)。

2 煤层显微地层数学模式

2.1 转移频数和转移概率

将每种显微煤岩类型作为马尔柯夫过程中的状态嵌入马尔柯夫链,使得煤层显微煤岩类型序列与马尔柯夫链拟合。不同煤分层的煤岩序列有所不

① 煤炭科学基金资助课题(95地10101)部分研究内容

收稿日期:1997-07-15 收修改稿日期:1998-04-26

同, 故需对各煤分层单独进行拟合, 不同分层得出自己的状态转移频数矩阵和状态转移概率矩阵。对于夹矸分层和顶底板, 由于其岩性单一, 因而不具有马尔柯夫过程的特性。显然, 在转移频数和转移概率矩阵中, 元素值越大, 所表示方向的转移倾向就大, 反之则小。

研究表明: 煤层显微煤岩类型序列转移频数和转移概率矩阵是近似的对称矩阵, 表明煤分层内的统计顺序对统计结果影响不大, 即无论是从顶部向下还是从底部往上进行统计, 显微煤岩类型的局部顺序都是相近的^[4]; 序列转移频数和转移概率矩阵的对角线元素给出了同一状态内部之间的转移次数和频率, 故它直观地反映出各种显微煤岩类型的条带厚度。

2.2 煤层显微地层特征序列

煤层显微地层特征序列表示组成煤层的各种显微煤岩类型之间的转移规律。不同煤分层的煤岩类型组成特点不尽相同。作者从状态转移概率矩阵入手, 分别求出各煤分层显微煤岩类型特征序列(表 2)。结果表明: 半亮煤的常见状态是 1、7、4、5, 这四

种状态及其之间的转移控制着半亮煤的显微地层序列, 其特征序列为 1715147574541; 富微惰煤半暗煤的主要状态是 2、6、5、7, 特征序列为 2625272656765757; 微三合煤含量较高的半暗煤的主要状态为 7、2、6、5, 特征序列是 7276752625657; 富微矿物煤暗煤的主要状态 8、2、6、5, 特征序列为 82868526256568。

2.3 煤层显微地层马氏链特性检验

在已算出状态转移概率的基础上, 可以检验煤层显微地层是否具备马尔柯夫链特性。通常的方法是对链中各状态之间的独立性的一种零假设检验^[5,6], 检验结果如表 3 所示。

检验结果显示: 统计频数越多, 统计检验值越大, 反之越小; 各状态出现的机会(频数)越相近, 统计检验值越大, 反之则小; 统计检验值远远大于 99%置信水平($X_{\alpha}^2 = 0.001$)的临界值(59.7)。由此, 可以得出结论: 设例煤层中各煤分层(除夹矸)的显微煤岩类型序列均具有马尔柯夫链性质, 置信度极高, 表明马尔柯夫链方法是研究煤层显微层序地层学的有效数学工具。

表 1 显微煤岩类型代码对应表

Table 1 Codes for basic microlithotypes

代 码	1	2	3	4	5	6	7	8
显微煤岩类型	微镜煤	微惰煤	微壳煤	微亮煤	微镜惰煤	微暗煤	微三合煤	微矿物煤

表 2 准格尔煤田六煤显微煤岩地层实测和模拟特征序列

Table 2 Microlithotype sequence(real and simulated) for No. 6 coal seam in Jungar coalfield

分层号	煤岩类型	实测序列特征序列	模拟序列特征序列
X V	暗 煤	2826252368672	62686728276525
X IV	半亮半暗	757615274725178	7576717278
XII	半亮煤	15751712721418252	171575121418747
XI	半暗煤	272624767525742	27267652575624212
X	半亮煤	1714751576521854127	1715751412161
VIII	半暗煤	7672627571747	767275717426256516
VII	暗 煤	828685262	828685262
VI	半暗煤	26257675272	26272521247656757828
V	光亮煤	181751415745471	1714151812757485
IV	半暗煤	272526217565671516	272526757651621247
III	暗 煤	828186858462127872	82818786842158
II	半暗煤	767527478626	7672657447628
I	半亮煤	141757151274525	1715121416575474527

表3 准格尔煤田六号煤各分层马氏特性检验值

Table 3 Result of tests for Markov character of No. 6 coal seam stratification in Jungar coal field

分层号	XV	XIV	XII	XI	X	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I
检验值	76.3	130.4	117.2	84.9	118.8	284.8	281.1	221.9	88.9	97.6	90.7	84.5	216.1

3 煤层显微地层序列模拟

煤层显微煤岩地层序列模拟包括两个方面,一是显微煤岩类型产出序列模拟,二是模拟各显微煤岩类型的厚度。利用一重马尔柯夫链模拟煤层显微地层序列时,应遵循两个基本原则:一是每种显微煤岩类型在序列中出现具有等可能性,即显微煤岩类型在序列中出现的概率服从均匀分布;二是序列中每种显微煤岩类型条带总是薄层多于厚层,即每种显微煤岩类型的厚度分布近似于对数正态分布^[5]。遵照这些基本原则,对设例煤层各分层进行模拟,模拟结果表明:

第一,实测序列的状态转移概率矩阵是一个近对称分布的正交矩阵,模拟序列的状态转移概率矩阵亦是一个近似对称分布的正交矩阵,但后者对称度明显降低,有的甚至不具有对称性。

第二,实测序列状态转移概率矩阵对角线元素很直观地反映出状态厚度,模拟序列状态厚度是按对数正态分布规律从实测状态厚度中随机取得的。因此,后者中对角线元素只能反映同一状态按不同的厚度发生转移的频率,而不能直观地反映该状态的厚度。

第三,模拟序列有“增主减次”的作用,即在模拟过程中,主要状态得到进一步加强,而次要状态进一步减弱(II分层)。“增主减次”作用虽然普遍发生,但其作用程度不尽相同,原始煤层显微煤岩类型厚度之间差异性越大,增减幅度越大(III X V分层),反之越小(VI, VIII, XII分层)。这种作用必然使模拟序列更加主次分明,有利于对主要分层进行分析。

第四,虽然模拟序列有“增主减次”的作用,但总体来看,模拟序列与实测序列中同类分层的厚度是基本相等的,再次表明马尔柯夫链模拟方法是可行的。模拟序列可以模拟各种显微煤岩类型在煤层中分布及其出现的位置(图1),这对厚煤储层物性非均质性预测具有明显的指导意义。

4 煤储层吸附潜势非均质性特征预测

煤层甲烷主要是以吸附方式赋存于煤层孔隙空

间,因此煤的内表面积大小与吸附潜势密切相关。不同的煤岩类型显微组成不同,导致其孔隙比表面积有所差异,故对孔隙比表面积分布不均一性特征的模拟有助于煤储层吸附潜势非均质性预测。

4.1 孔隙比表面积与煤岩组成的关系

设例煤层不同煤岩类型孔隙比表面积测试结果见表4。测试样品的煤岩组成列于表5。分析得出:

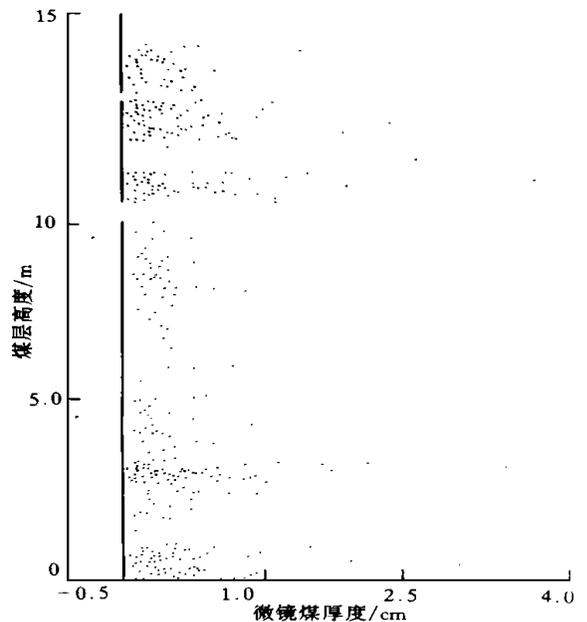


图1 设例煤层显微煤岩类型模拟厚度分布图

Fig. 1 Plot of the simulated thickness of vitrinite bands of coal seam

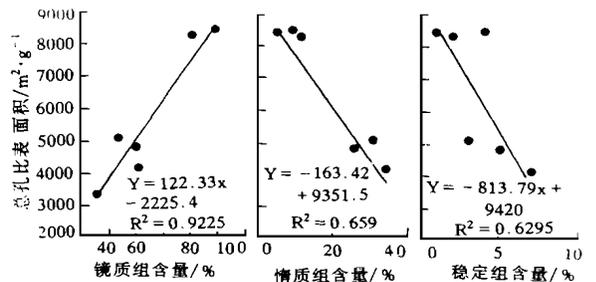


图2 准格尔煤田六号煤显微组分与孔隙比表面积关系图

Fig. 2 Relationship between macerals and pore surface area of No. 6 coal seam in Jungar Coalfield

设例煤层总孔隙比表面积以镜煤、亮煤最大, 丝炭次之, 暗煤最小; 不论煤岩类型如何, 孔隙比表面积主要分布于极微孔、微孔和过渡孔孔径段, 暗示着煤的孔隙比表面积主要取决于较小孔径的孔隙; 不同的

煤岩类型中孔隙比表面积的孔径分布比率明显不同, 大孔和超微孔主要出现在丝炭中, 其次是亮煤, 镜煤和暗煤中较少, 表明煤岩组成对孔隙比表面积产生了重要影响。

表 4 准格尔煤田六号煤孔隙比表面积分布表

Table 4 Pore Surface area of No. 6 coal seam in Jungar Coalfield

煤 样 号	比 表 面 积 ($\times 10^{-2} \text{m}^2/\text{g}$)							表 面 积 比 /%					
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_t	S_1/S_t	S_2/S_t	S_3/S_t	S_4/S_t	S_5/S_t	S_6/S_t
ZG0201	0.2	6.4	1 238	400	6 530	311	8 486	-	0.1	15	5	77	4
ZG0202	0.7	7.8	1 352	830	6 033	110	8 334	-	0.1	16	10	72	1
ZG0203	0.8	52	1 167	686	3 226	52	5 184	-	1.0	23	13	62	1
ZG0204	1.0	35	1 081	1 034	4 470	630	7 251	-	0.5	15	14	62	9
ZG0801	0.1	4.9	1 280	471	6 583	208	8 547	-	0.1	22	5	73	
ZG0802	0.1	6.3	916	247	3 476	288	4 934	-	0.1	19	5	70	6
ZG0803	0.4	18	791	449	2 024	134	3 417	-	0.5	23	13	59	4
ZG0804	2.7	17	823	396	2 959	55	4 252	-	0.4	19	9	70	1

注: S_1 —大孔($\varnothing > 1\ 000\ \text{nm}$), S_2 —中孔($1\ 000\ \text{nm} > \varnothing > 100\ \text{nm}$), S_3 —过渡孔($100\ \text{nm} > \varnothing > 10\ \text{nm}$), S_4 —微孔($10\ \text{nm} > \varnothing > 5\ \text{nm}$), S_5 —极微孔($5\ \text{nm} > \varnothing > 2\ \text{nm}$), S_6 —超微孔($\varnothing < 2\ \text{nm}$), S_t —总孔比表面积, “-”—值较小

表 5 准格尔煤田六号煤层实验样品显微组分含量

Table 5 Content of macerals for No. 6 coal seam in Jungar Coalfield

样 品	煤岩 类型	有机组分/%			有机+无机/%			
		V	I	E	V	I	E	M
ZG0201	镜煤	89.2	5.5	5.3	88.8	5.5	5.3	0.4
ZG0202	亮煤	80.6	11.8	7.6	80.2	11.8	7.6	0.6
ZG0203	暗煤	54.0	30.6	15.4	53.2	30.1	15.2	1.5
ZG0801	镜煤	88.6	9.5	1.9	87.9	9.4	1.9	0.0
ZG0802	亮煤	60.5	25.9	13.6	58.5	25.1	13.2	3.2
ZG0803	暗煤	56.4	26.8	16.8	54.1	25.7	16.1	3.9
ZG0804	丝炭	61.3	33.9	4.8	60.8	33.7	4.8	0.7

设例煤层显微组分与煤总孔隙比表面积以及与各孔径段孔隙比表面积之间的关系(图 2, 表 4, 表 5)表明: 镜质组含量的增加, 过渡孔、微孔和极微孔的比表面积急剧上升, 即镜质组是煤中小孔径孔隙的主要贡献者, 由于这三种类型孔隙比表面积占煤总孔比表面积的比例最大, 所以镜质组也是总孔比表面积的主要贡献者; 惰质组含量的增加引起大孔、中孔比表面积增大, 其它孔隙比表面积则有不同程度下降, 说明煤中的大孔、中孔主要分布在惰质组中, 而大孔、中孔的比表面积在煤中所占的比例最

小, 所以惰质组含量与总孔比表面积之间必然呈负相关关系; 稳定组与孔隙比表面积之间关系与惰质组相似, 但变化幅度较小, 离散性较大, 规律不甚明显。三大组分与总孔比表面积之间都具线性相关, 但镜质组的相关度较高, 其它两种组分的相关度较低。

4.2 孔隙比表面积非均质性分布特征模拟

显微组分与样品总孔比表面积之间的多元线性逐步回归分析结果可用下式表示:

$$S(t) = -495.7 + 106.3 V - 32.4 I$$

($r=0.966, 95\% < \text{置信度} < 99\%$)

式中: $S(t)$, 煤孔比表面积, m^2/g ; V , 镜质组含量, %; I , 惰质组含量, %。该式揭示: 设例煤层的总孔比表面积主要取决于镜质组含量, 惰质组次之, 壳质组是极为次要的影响因素。

由于煤层模拟序列的组成单位是显微煤岩类

型, 所以仍以等概率随机出现的原理, 将模拟序列显微煤岩类型的含量转化为显微组分的含量, 然后将镜质组和惰质组的含量代入回归公式, 计算各分层的孔比表面积, 设例煤层模拟序列各分层孔比表面积预测值列于表6。

由表6可以看出: 设例煤层总孔比表面积在垂

表6 准格尔煤田六煤各分层孔隙比表面积预测值 (m^2/g)

Table 6 Predicated value of the pore surface area for No. 6 coalfield Field

分层号	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	X	XI	XII	XIV	XV
预测值	5 416	158	—	1 416	6 939	19	—	496	6 374	64	4 816	2 652	—

注: “—”表示值极小

向上分布的非均质性极为显著, 光亮煤和半亮煤的孔隙比表面积最大, 富矿物暗煤、暗煤的最小。换言之, 设例煤层中V、X、I和XII分层对煤层甲烷的吸附潜势较大, 而II、III、VI、VII和XV分层的吸附潜势相对较小。

5 结论

煤层条带状结构具有马尔柯夫链特性, 故马氏链方法适用于描述煤层垂向非均质性特征。煤层显微煤岩类型序列的统计顺序对统计结果影响不大, 即其局部顺序是近于相同的。应用马氏过程模拟煤层结构应遵循一个基本原则, 即显微煤岩类型在序列上的分布服从均匀分布, 显微煤岩类型厚度分布服从对数正态分布。

煤层显微煤岩序列模拟过程是一个“辩证”过程, 在序列模拟过程中将会发生“增主减次”的作用, 作用的强弱程度取决于统计显微煤岩类型厚度的差异性, 差异性越大, 作用越强, 反之越小。这种作用有助于准确而简便地预测显微煤岩类型条带在煤层

中产出位置及其相互之间的转换关系。

根据所建立的煤层显微煤岩序列数学模式和地质模式, 结合对煤储层物性(如孔隙比表面积)数据的拟合, 可以预测有利物性在煤层中的分布位置, 这一结果对厚煤层物性非均质性的评价尤有指导意义。

参 考 文 献

- 1 门桂珍, 史晓红, 赴淑芝. 马尔柯夫链-熵分析在环境分析中的应用. 煤炭学报, 1989, 14(1): 55~65
- 2 景毅. 马尔柯夫过程在数学地质中的应用. 北京: 地质出版社, 1986. 32~94
- 3 郭光裕. 马尔柯夫概型分析及其在地质研究中的应用. 地质与勘探, 1992, 28(8): 29~34
- 4 Smyth M, Buckley M J. Statistical Analysis of the Microlithotype sequence in the Bulli Seam, Australia, and relevance to Permeability for Coal. International Journal of Coal Geology, 1933, 22(2): 167~187
- 5 徐振邦, 姜元云. 数学地质基础. 北京: 北京大学出版社, 1994. 283~294
- 6 Harbaugh J W, Bonham-Carter G. 地质过程的计算模拟. 罗文彦, 何宝侃, 陆成译. 北京: 地质出版社, 1986. 57~97

Micro-stratigraphical Model of Coal Seam and Its Application To Evaluation of Coal Reservoirs' Physical Property

Zhang Yousheng Qin Yong Chen Jialiang

(College of Mineral Resources and Environment Science China

University of Mining and Technology Xuzhou Jiangsu 221008)

Abstract

Based on the principle and method of Markov Chain, the mathematic model was established in order to describe the forming process and the micro-sequence of coal seam, The following conclusions have been drawn: (1)The test values are far more greater than the critical points at different confidence levels, the microlithotype sequence of coal seam is fit to the Markov Process. (2)The statistic direction of the microlithotype sequence within each sublayer has hardly effect on the analysis result. (3)The thickness of the main states will be increased and that of the secondary decreased during the simulation of microlithotype sequence. This thickness change will make the simulating microlithotype sequence simple and clear. (4)The location of each microlithotype for a case was defined through the model fitting to coal structure, so the heterogeneous characteristics of coalbed methane(CBM) were predicated. (5)The advantageous gas-storing location in the coal seam can be forecasted by combining the analysis of the specific surface area of pore and the gas-storing capacities of the different macerals with the microlithotype sequence of coal seam. So a new insight to evaluation on geological conditions of CBM development has been given.

Key words Markov Chain micro-sequence of coal seam coal reservoir pore surface area

(Continued from page 108)

characteristics have also been discovered: (1) the former three major stages of hydrodynamic evolution are closely related regional tectonic evolution stage; (2) the distribution of fluid pressure is controlled by related sedimentation (rate, thickness); (3) although the objective layers is old (late Palaeozoic era), the contribution of compactional flow in hydrodynamics is still evidently more than of gravitational flow, even in nowadays.

Key words palaeo-hydrodynamics fluid potential fluid pressure upper Palaeozoic group Ordos Basin