

浙西上奥陶统复理石韵律的 马尔可夫链模拟

吕洪波 夏邦林

(南京大学地质系)

本文采用沉积作用的马尔可夫链模拟方法对浙西上奥陶统复理石的韵律结构特征进行了研究。通过韵律结构模式对比及熵值分析,阐述了浙西复理石盆地的浅海特征及不同相带间沉积环境的差异。据该项探讨所得出的推论同其他方面的研究结果是吻合的。

沉积作用的马尔可夫链模拟是沉积学领域中一种较新的数学地质方法,可以用来模拟地层层序、岩相序列、韵律结构等,为沉积环境的探讨提供新的信息。目前国内在这方面的研究还很少,然而国外已有不少成功的先例,如 A. Б. Вистелиус^[1], W. Schwar-zacher^[2], M. F. Decey 和 W. C. Krumbein^[3], I. Hattori^[4,5]等的研究。J. W. Harbaugh 与 G. Bonham-Carter (1970) 则在理论上进行了系统的论述和较为全面的归纳总结^[6]。作者借鉴上述诸位学者的方法,对浙西复理石的韵律结构进行了马尔可夫链模拟,并通过区域对比,探讨了复理石的沉积环境。虽属尝试,然结果是令人满意的。

一、地质背景

浙西早古生代沉积盆地位于扬子古陆东缘,为一自南西向北东撒开的楔形盆地,总面积达 2000km²。盆地内上奥陶统发育了一套厚达 1000—2000m 的复理石建造(图 1)。自 1959 年首次报道^[7]以来,先后有许多学者对该复理石建造从不同侧面进行了不同程度的研究^[8,9],然而对其沉积环境尚有不同的认识。

作者自 1983 年以来再次对该复理石进行了系统的研究,包括韵律结构的模拟。在盆地内不同地点的于潜组(O₃yu)、长

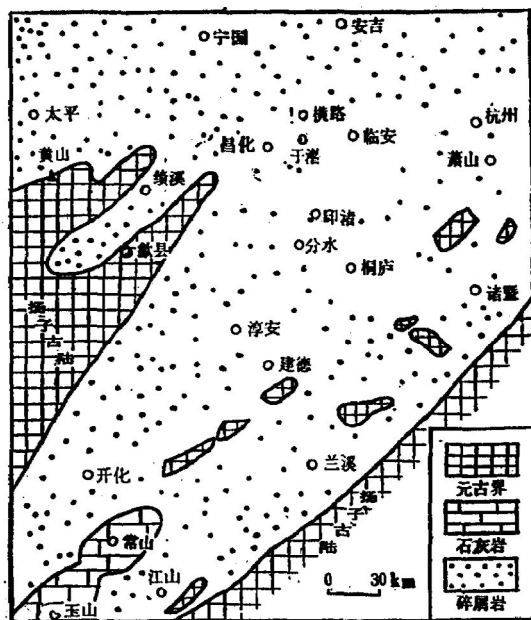


图 1 浙西盆地晚奥陶世于潜期岩相简图

坞组 (O_3ch) 及张村坞组 (O_3zh)¹⁾ 野外露头上, 作者详测了14条剖面的韵律结构, 将所测数据在 Apple-2 微机上进行了模拟, 用区域对比及熵值分析等方法阐述了该复理石盆地的分带特点, 得出了该复理石为浅水成因的结论。

二、模拟及计算方法

马尔可夫链的算法较多, 作者主要参照 J. W. Harbaugh, G. Bonham-Carter^[7] 和 I. Hattori^[5] 所提出的计算公式, 采用自然岩性取样和一重嵌入链计算, 单独统计岩性单元厚度。

1. 取样

据粒度粗细、层理类型、递变情况、界面性质等因素, 共设立8个状态 (即岩性单元)。不同状态所代表的水动力学条件、沉积物供应量等是不同的, 因此, 讨论这些状态在岩层剖面上的转移规律, 也就是讨论古水动力条件等随时间的变化规律, 可以达到恢复古沉积环境的目的。当然, 正确划分及识别这些状态是取样的关键。本文所提的8个状态在某一具体剖面上不一定都出现, 但在整个浙西复理石中却是客观存在的, 现介绍其特征如下:

A——砂到粉砂 (或砂到泥) 的宏观正递变单元;

B——砂到粉砂 (或砂到泥) 的宏观正递变单元, 但伴有前积纹、波状纹等纹理;

M——块状细砂或粉砂单元;

D——各种纹层状细砂或粉砂单元;

E——块状泥岩单元;

F——水平纹或水平条带状泥岩单元;

G——清晰而平整界面;

H——波状界面或冲刷面。

野外测出岩性交互序列、各单元平均厚度及砂岩层与泥岩层的厚度比 (表1)。

2. 计算步骤

设一剖面共具有 N 种状态, 且该 N 种状态是 {A, B, M, D, E, F, G, H} 的子集。

第一步: 建立频数转移矩阵 C

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \cdots C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} \cdots C_{2N} \\ \vdots & \vdots \\ C_{N1} & C_{N2} \cdots C_{NN} \end{pmatrix}$$

式中 N ——状态数

C_{ij} ——剖面中自第 i 状态向上转移到第 j 状态的频数

第二步: 求出概率转移矩阵 P 、 Q

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_i} \quad q_{ji} = \frac{C_{ji}}{C_j}$$

1) 于潜组和长坞组层位相当, 在盆地南东侧称长坞组, 在北西侧则称于潜组, 张村坞组连续沉积于于潜组之上。

表1 浙西复理石的律测量结果一览表

测号、测点及层位	岩性单元交互序列(自下而上)	各单元平均厚度	砂层与泥层厚度比
①于潜张村坞组 (O ₃ zh)	AGFHDGAGEGMGEHBGEGAGFHAFAH AGFGDGFHAHFHAGEGDGEGAGEGEGCGB HAGBH	A=7.7 (cm) B=8, M=5.25 D=3.33 E=2.79 F=6.42	2.06
②于潜于潜组 (O ₃ yu)	EGBHMHEGDEHBGFAGBHBHBGFHDH DEHBHDMGDEGAHCHDEHABGDAGBGBGB GBHDGBH	A=3.8 B=4.8 M=5, F=5 D=2.5 E=2.8	4.54
③于潜于潜组 (O ₃ yu)	FAGEGFGEHBGEFHMGBGDHDGBGEHM GEHDHEHDHBGEHBHEHBHEHMDHEGFGE HM	A=7, F=2 B=3.5 M=3.9 D=4.5 E=3.2	1.78
④于潜于潜组 (O ₃ yu)	EHBGDGEFGGEHBGEGDGEGBHDGE HAHEGDGEGDGEGBHEHAGDGEH	A=6.5 B=6.8 D=4.5 E=3.2 F=2	3
⑤于潜于潜组 (O ₃ yu)	EHBGDGEGBGEFGDEHBGBGDEHDE HADGFGEGEGBEHADHEHAHFHADH BGEH	A=9.5 B=4.3 D=2.9 E=4.3 F=3	2.44
⑥于潜于潜组 (O ₃ yu)	EHADHFHAGEHADGAGEHADHEGBHAD HEHBHADGBHBFBHEGBHADHEGDGEDHEH AHEGMGEHBGBHAGFHDGEHAGBHAGDHE GDGEHAGDHEHDGEHBDHEGDGFHAGDHE BGFE	A=6.4 B=4.6 M=1 D=2.6 E=3.1 F=5.8	2.32
⑦昌化于潜组 (O ₃ yu)	EHABHDFHBEHBGEGDEHBHBHFHM HAGBGFHDAMMBHEGFHMGAGAGE GBHBGBHBGE	A=8, D=4 B=8.3 M=6.7 E=5.7 F=10.3	2.13
⑧桐庐印清长坞组 (O ₃ ch)	DGEGFGFGFGFGFHBEBHDFHBGFGDGEG BGDGEDGEGBGEGDGEDGFGFBGEGDGF DGEHAGFGEGDGEDGFGDGEDGFGDGEFG	A=10 B=4.1 D=3.4 E=4.9 F=9.9	0.38
⑨兰溪东风水库长 坞组(O ₃ ch)	DGEGBGEGDGBGFGDGFGDGEDBGBGE GDGDGFGDGBDGDGDGEDGFGDGEDGD GEGBHDGEGDHBGBGBHDH	B=2.8 D=3.2 E=1.3 F=3.8	3.18
⑩兰溪东风水库长 坞组(O ₃ ch)	GDHEGDHEGDHEGDHEGDHEGDHEG DHEGDHEHDHEGDHEGDHFGDHEGD HEGDH	D=1.6 E=1.5 F=0.7	1.20
⑪兰溪东风水库长 坞组(O ₃ ch)	MHBHBHBGBGBGBHFBHFBHFBHFGDGF GDGFGDGEDDHEHBHBGDGDHGBDHBGFH BGDHBGDGMH	B=10.93 M=66.5 D=4.90 E=4 F=3.70	8.64
⑫杭州长坞组 (O ₃ ch)	BEHDGEDGEGDGEHBGEHBEGMGEHD EGBGDAHDAHDEHBEHAHAGAGAHBHBHE HDGEHDHAHDAHGBGEHDGE	A=1.7 B=4.5 M=2 D=2.3 E=2.1	0.84
⑬江山于潜组 (O ₃ yu)	DGEGDGEDEDEGDADGEGDGEDGEGD GEFEGDEHDGEHDGEHDGEGDEHDE	D=2 E=2.52 F=0.5	0.70
⑭于潜横路于潜组 (O ₃ yu)	DGDGEHAHMDGEDGEHBGEHBGEHMG GAHBGDGAHBHBGBHAGDGEHAGDGAGDG EHMBGE	A=6.33 B=6.93 M=4.67 D=5 E=3.12	1.68

A、B、M、D、E、F分别代表不同的岩性单元，G、H分别代表性质不同的界面，这6种岩性单元及2种界面就是文中所述的8个状态。

式中 C_i ——C 阵中第 i 行之和

C_j ——C 阵中第 j 列之和

p_{ij} ——向上转移概率

q_{ij} ——向下转移概率

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \cdots p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} \cdots p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} \cdots p_{NN} \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \cdots q_{1N} \\ q_{21} & q_{22} \cdots q_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{N1} & q_{N2} \cdots q_{NN} \end{pmatrix}$$

利用矩阵 P 或 Q 即可简化旋回模式, 得出复理石的理想韵律结构, 本文即用此法。

第三步, 计算极限概率矩阵 PL 及固定向量

实际上是计算转移概率矩阵 P 的幂, 当幂次 n 趋于无穷大时所得的概率矩阵便是极限概率矩阵 PL 。

设从第 i 状态开始, 经过 n 步后达 j 状态的概率为 $p_{ij}^{(n)}$, 则矩阵 $P^{(n)}$ 为:

$$P^{(n)} = \begin{pmatrix} p_{11}^{(n)} & p_{12}^{(n)} \cdots p_{1N}^{(n)} \\ p_{21}^{(n)} & p_{22}^{(n)} \cdots p_{2N}^{(n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N1}^{(n)} & p_{N2}^{(n)} \cdots p_{NN}^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \cdots p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} \cdots p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} \cdots p_{NN} \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \cdots p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} \cdots p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} \cdots p_{NN} \end{pmatrix}}_{(n-1) \text{ 次} \times \cdots \times}$$

即:

$$P^{(n)} = P^{(n-1)} \cdot P$$

如:

$$P^{(2)} = P \cdot P, \quad P^{(3)} = P^{(2)} \cdot P, \dots$$

当 n 趋于无穷大时, 便有:

$$PL = \lim_{n \rightarrow \infty} P^{(n)}, \quad \text{且}$$

$$p_{ij}^{(n)} = p_i \text{ (常数)}, \quad \sum_{j=1}^N p_i = 1$$

这表明达到极限时, 以任一状态达到某一状态的概率值都相等, 而与初始状态无关。

PL 阵中任一行提出来便是固定向量:

$$[p_{11}^{(n)} \quad p_{12}^{(n)} \cdots p_{1N}^{(n)}] \quad (n \rightarrow \infty)$$

该行向量可代表剖面中各种状态所出现的次数比, 等间距取样时则代表各状态的厚度比。因本文采用嵌入链计算, 故各状态的固定向量值乘以其本身的厚度分布值 (一般取平均值) 便是剖面中各种岩性的总厚度比。

实际计算中给出一定的精度要求 (本文采用 0.01), 则经过有限的次数 (即 n 为某一整数时) 即可得到满意的 PL 阵, 本文计算一般低于 8 次 ($n < 8$) 即完成计算。然而

出现一种特殊情况, 当频数转移矩阵呈下述特征, 如

$$C = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} & A & B & M & D & E \\ \begin{array}{c} A \\ B \\ M \\ D \\ E \end{array} & \left(\begin{array}{ccccc} 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ & \text{I} & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ \hline 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{array} \right) \end{array} \end{array}$$

时, 这些状态分成 I (含 A、B、M) 和 I (含 D、E) 两组, 构成二个复合反射状态。此二个复合反射状态各自内部的元素不能相互转移 (C_{ij} 均为零), 必须通过对方实现状态的转移, 即从 I 中某一状态必然转移到 I 中的某一状态, 然后又必然返回到 I 中的某一状态。因此剖面中 A、B、M 三状态总数与 D、E 二状态总数之比应为 1:1。此时 $p_{ij}^{(n)}$ 值不能收敛。这种马尔可夫链称为循环链 (cyclic chain) [6], 其性质尚待进一步研究。作者对此种情况作了如下的处理:

令 n 为某一大于 8 的整数 (本文令 n 为 10), 则可得到下述形式:

$$PL = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} & A & B & M & D & E \\ \begin{array}{c} A \\ B \\ M \\ D \\ E \end{array} & \left(\begin{array}{ccccc} x & y & z & 0 & 0 \\ x & y & z & 0 & 0 \\ x & y & z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & \beta \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & \beta \end{array} \right) \end{array}, \quad \begin{cases} x+y+z=1 \\ \alpha+\beta=1 \end{cases}$$

x 、 y 、 z 可看作 A、B、M 三状态间的固定向量值, α 、 β 可看作 D、E 二状态间的固定向量值, 而 A、B、M、D、E 五状态间的固定向量可表示为:

$$\left[\frac{1}{2}x, \frac{1}{2}y, \frac{1}{2}z, \frac{1}{2}\alpha, \frac{1}{2}\beta \right]$$

如此处理后完全符合实际剖面的特点, 因此上述结论是可用的。

第四步: 计算置换阵 L 、 R 、 Me

左置换阵

$$L = (l_{ij})$$

$$l_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N p_{ik} \cdot p_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N p_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^N p_{jk}^2}}$$

即利用 P 矩阵对状态 i 和状态 j 计算它们第 i 行和第 j 行行向量间的相似系数。

右置换阵

$$R = (r_{ij})$$

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N q_{ki} \cdot q_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N q_{ki}^2 \cdot \sum_{k=1}^N q_{kj}^2}}$$

即利用 Q 矩阵对状态 i 和 j 计算第 i 列和第 j 列列向量的相似系数。

互置换阵

$$M_s = (m_{ij}) = L \cdot R$$

即 L 与 R 相乘, 又曰交叉置换矩阵。

利用 L 、 R 或 Me 可分析岩层的变化规律, 看它们是否具有某种相似性。如

$$EF = 1 \quad (M_s \text{ 阵})$$

说明 E 、 F 二状态在剖面中可注意相互代替, 二者占有相同的位置, 很可能是极相似的条件形成的, 只是外表上有所差异, 而研究者依这些差异将它们分成 E 、 F 二状态。

第五步: 计算熵值 $E_i^{(pos)}$ 、 $E_i^{(pre)}$ 、 $E_{N_i}^{(pos)}$ 、 $E_{N_i}^{(pre)}$ 、 E_s 。

后熵:

$$E_i^{(pos)} = - \sum_{j=1}^N p_{ij} \cdot \log_2 p_{ij}$$

前熵:

$$E_i^{(pre)} = - \sum_{j=1}^N q_{ij} \cdot \log_2 q_{ij}$$

对它们进行正规化:

$$E_{N_i}^{(pos)} = E_i^{(pos)} / \left\{ -\log_2 \left[1/(N-1) \right] \right\}$$

$$E_{N_i}^{(pre)} = E_i^{(pre)} / \left\{ -\log_2 \left[1/(N-1) \right] \right\}$$

熵是状态不确定性的量值, 熵越大则状态出现的不确定性越大。显然, 状态数 N 越大则熵值 E_i 也越大。为了消除 N 的影响, 利于状态不等的矩阵间的对比, 故进行正规化处理, 经处理的熵值 $E_{N_i}^{(pos)}$ 、 $E_{N_i}^{(pre)}$ 值均不大于 1, 这样便可作熵图并进行归类比较, 研究岩性转移规律的强弱。熵值越小状态转移的规律性就越强。

系统熵值:

$$E_s = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}} \right) \cdot \log_2 \left(\frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}} \right)$$

计算时若遇 C_{ij} 为零的情况则该项 C_{ij} 不予计算, 相当于令

$$\frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}} \cdot \log_2 \left(\frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}} \right) = 0$$

E_i 值的范围为:

$$-\log_2 \left(\frac{1}{N} \right) < E_i < -\log_2 \left[\frac{1}{N(N-1)} \right]$$

⑤ 于潜	于潜组 O_3yu	4.14	$\rightarrow H \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow$ $\rightarrow H \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow$	8.6 16.7	$BF=0.72$
⑥ 于潜	于潜组 O_3yu	4.23	$\rightarrow B \rightarrow H \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow$	12.1	$BE=0.88$ $BF=0.85$
⑦ 昌化	于潜组 O_3yu	4.36	$\rightarrow A \rightarrow G \rightarrow B \rightarrow H \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow$	14	$BM=0.9$ $AB=0.86$ $AM=0.81$
⑧ 桐庐印渚	长坞组 O_3ch	3.46	$\rightarrow G \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow$ $\rightarrow G \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow$ $\rightarrow G \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow$	4.9 9.9 3.4	$EF=0.98$ $DE=0.97$ $DF=0.94$
⑨ 兰溪 东风水库	长坞组 O_3ch	3.26	$\rightarrow G \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow$ $\rightarrow G \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow$ $\rightarrow G \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow$	3.2 2.6 1.3	$EF=1$ $DE=0.98$ $DF=0.98$ $BD=0.97$ $BE=0.93$ $BF=0.93$
⑩ 兰溪 东风水库	长坞组 O_3ch	2.29	$\rightarrow G \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow$	3.1	$EF=1$
⑪ 兰溪 东风水库	长坞组 O_3ch	3.71	$\rightarrow B \rightarrow H \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow$	15.8	$EF=0.95$ $BE=0.91$ $BF=0.90$
⑫ 杭州	长坞组 O_3ch	3.99	$\rightarrow H \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow$	4.4	$BD=0.63$ $AE=0.63$
⑬ 江山	长坞组 O_3ch	3.04	$\rightarrow G \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow$ $\rightarrow G \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow$	2 2.52	$DE=0.54$
⑭ 于潜横路	于潜组 O_3yu	3.82	$\rightarrow H \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow$	10.05	$AB=0.75$

表3 浙西复理石韵律结构模拟标准值

测号	地点	前 烧 $E_N^{(pre)}$								后 烧 $E_N^{(post)}$							
		A	B	M	D	E	F	G	H	A	B	M	D	E	F	G	H
①	于潜	0.33	0.33	0	0.33	0	0.45	0.79	0.63	0.41	0.33	0	0	0.21	0.23	0.66	0.51
②	于潜	0.53	0.46	0.33	0.34	0.26	0	0.70	0.81	0.53	0.36	0.33	0.62	0.36	0.36	0.63	0.73
③	于潜	0	0.33	0	0.49	0.34	0.33	0.86	0.58	0	0.33	0.33	0.26	0.39	0.53	0.57	0.71
④	于潜	0	0.39	/	0.25	0.28	0	0.75	0.50	0.39	0.39	/	0	0.38	0	0.64	0.75
⑤	于潜	0	0.39	/	0.56	0.65	0.61	0.73	0.61	0.31	0.25	/	0.60	0.50	0.36	0.71	0.79
⑥	于潜	0.13	0.35	0	0.69	0.35	0.49	0.73	0.74	0.47	0.56	0	0.36	0.44	0	0.81	0.66
⑦	昌化	0.49	0.44	0	0.33	0.64	0.53	0.66	0.78	0.54	0.47	0.33	0.56	0.36	0	0.77	0.80
⑧	桐庐印油	0	0.38	/	0.16	0.15	0.15	0.76	0.38	0	0.26	/	0.15	0.24	0.31	0.71	0.63
⑨	兰溪	/	0.32	/	0.36	0	0	0.78	0.43	/	0.53	/	0.22	0	0	0.81	0.40
⑩	兰溪	/	/	/	0.19	0	0	0.21	0	/	/	/	0	0	0	0	0.37
⑪	兰溪	/	0.33	0	0	0.39	0.39	0.68	0.80	/	0.38	0	0.38	0.39	0.36	0.73	0.42
⑫	杭州	0.6	0.23	0	0.26	0.6	/	0.77	0.65	0.33	0.6	0	0.7	0.34	/	0.67	0.62
⑬	江山	/	/	/	0.71	0.62	0	0.49	0	/	/	/	0.47	0.84	0	0.49	0
⑭	于潜横路	0.39	0.44	0	0.44	0	/	0.75	0.56	0.39	0.33	0.61	0	0.41	/	0.65	0.60

短斜线表示所对应的状态在剖面中不存在。

三、地质意义讨论

1. 区域对比

用表2中简化的韵律结构序列及统计的厚度值，作者选择了8个典型剖面作出了韵律模式对比图（图2）。从图中可以看出，盆地南东部的江山-兰溪-杭州一带与西北部

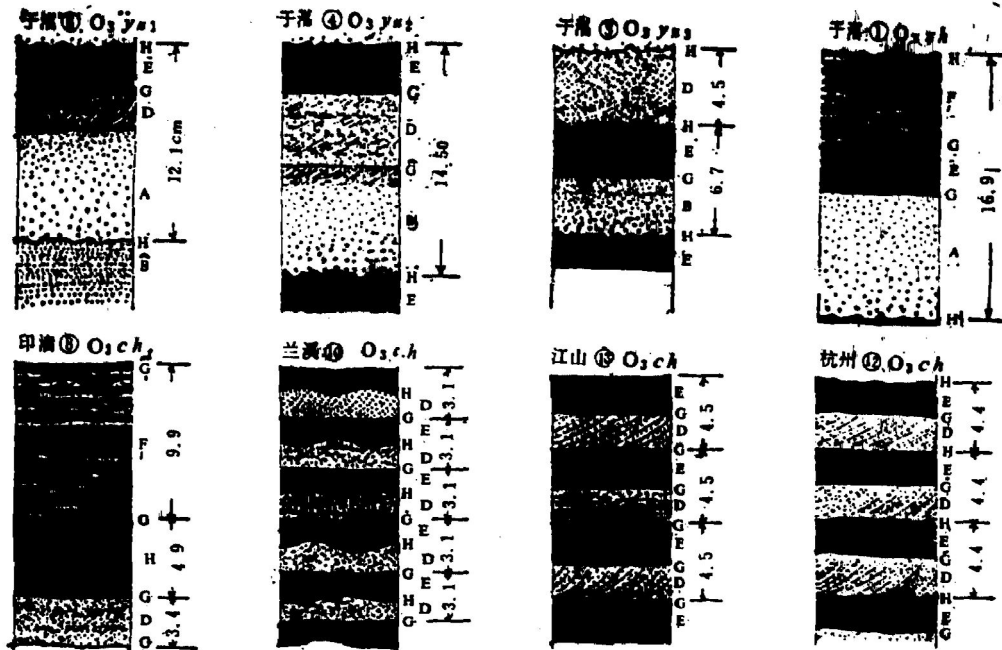


图2 据P序简化的韵律模式对比图

的于潜、昌化地区有显著的差别：

(1) 于潜、昌化、横路等地韵律结构中都存在宏观粒序单元 A 或 B，而东南部地区则没有宏观粒序单元；于潜等地韵律结构主要由 3 个单元构成，而兰溪等地则主要由 2 个单元构成（即缺少宏观粒序单元）。这都说明兰溪等地缺乏造成 A 或 B 粒序单元沉积的环境。

(2) 于潜等地韵律厚度大（10—15cm），江山、兰溪等地韵律厚度薄（3—5 cm）；然而它们的泥质单元厚度却极为相近（2—4 cm，表 1），因此其差别主要在于砂质单元的规模。

(3) 于潜等地韵律间发育较强烈的水流冲刷界面（冲槽、刻痕……，即 H 面），而兰溪等地韵律间界面则较平整（即 G 面），这反映了后者较前者造成底部单元沉积的水流之能量为低。

(4) 于潜一带韵律内部各单元间往往有宏观渐变关系（由粗到细），而兰溪一带韵律内部各单元间界线则十分清楚（图 2 之⑩、⑪、⑫），如图 2 中的⑩，砂质单元本身具前积纹或交错纹，底部为平整的突变界面，顶部为波状界面，泥质单元则在波状界面上平静地沉积下来，即砂质单元造形，泥质单元继承沉积，并不破坏砂质单元顶部的波状面，这是潮汐层理的特征，和野外观察十分吻合。

(5) 兰溪—江山一带砂泥比值较于潜一带的相应值低（个别段除外，表 1），主要原因也在于兰溪一带缺乏宏观粒序单元 A 或 B。

此外，古流向研究表明，兰溪—江山一带古水流均流向 NW，而于潜、昌化及开化一带流向则转为 NE。根据前面所提的 5 点差异及古流向特点可以推测：兰溪、江山一带为盆地的边缘，而于潜、昌化一带则为盆地的轴部，两侧的物质达轴部后发生转向，即横向供应，纵向搬运。

如果我们将泥质单元看作较缓慢的正常沉积，将砂质单元看作较迅速的事件性沉积，则泥质单元厚度在盆地各处所表现出的一致性，说明各处的砂质单元在沉积时间上有着一致的周期性，受着某种统一的因素制约，这个因素很可能是盆地两侧的陆块阶段性上升或风暴的周期性发生等，用单一的浊流说却难以解释。砂质单元规模的大小则反映了沉积物的供应量及沉积量，两侧的沉积物到达轴部后发生汇合，必然造成沉积量增大，故轴部较边缘的韵律厚度为大。

2. 熵值分析

I. Hattori (1976) 研究了熵值分布类型与沉积环境的关系，以 $E_N(\text{pre})—E_N(\text{post})$ 为坐标进行投影，总结出 6 种旋回类型（图 3），并指出，层序保存完整的复理石属 A-1 类，但绝大多数复理石属 A-4 类。他还指出，浅海环境剖面层序具 B 和 C 类熵图，河流冲积环境具 A-4 类熵图^[5]。作者将浙西复理石韵律结构模拟结果投影到 $E_N(\text{pre})—E_N(\text{post})$ 坐标中（图 4），与 Hattori 所划分的熵图类

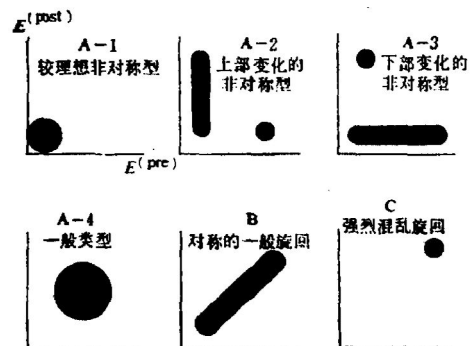


图 3 可能的熵值分布类型
(据 I. Hattori, 1976)

型进行比较。可以看出：印渚(⑧)、兰溪(⑨)、江山(⑬)一带具典型的B型熵图(包括于潜的①)，为浅海环境所特有；兰溪的⑩属于A-1型熵图，证明层序保存完整，没有造成强烈冲刷的水动力事件；昌化的⑦和横路的⑭为典型的A-4类分布，为许多复理石剖面常有的类型，具河流冲积环境特点；于潜的②、③、④、⑤、⑥以及兰溪的⑪和杭州的⑫具有B类和A-4类双重特征，说明浅海环境叠加了河流冲积性质的水动力条件，很可能是事件性水流造成的。总体上看，各剖面层序的熵图基本上都显示了浅海的特征，同时还反映出北西沉积带(于潜、昌化等地)与南东沉积带间的显著差别。当然，Hattori的分类还不够完善，他将所有不符合前述6种类型的熵图都归为D型(图3)^[5]，其意义也尚需进一步研究。因此，上述对比尚显粗浅，有待于深入探讨。

Hattori(1976)还对系统熵值进行了研究，在 $N-E_s$ 坐标中投影总结出煤系地层、河流及冲积扇、浅海相、复理石(指深海浊积岩)共5种沉积环境的投影区(图5)^[5]。尽管这种总结还不够成熟，然确实是用熵值探讨沉积环境的可贵尝试。作者将浙西复理石计算结果投影于 $N-E_s$ 坐标中，发现有3个点落在Hattori的浅海区，余者分散于浅海区下方和右侧，总分布区与Hattori的浅海区最接近，然而与他所指的复理石(深海浊积岩)区(⑤)却没有丝毫相似之处(图5)。

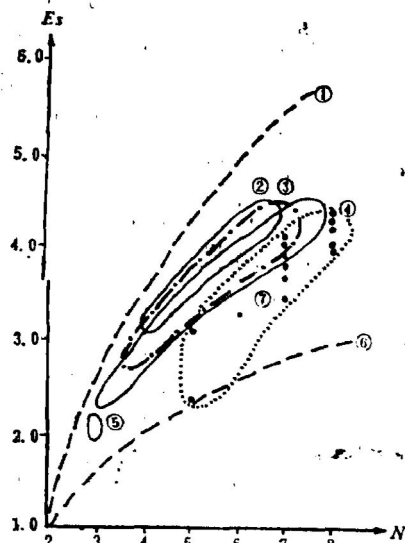
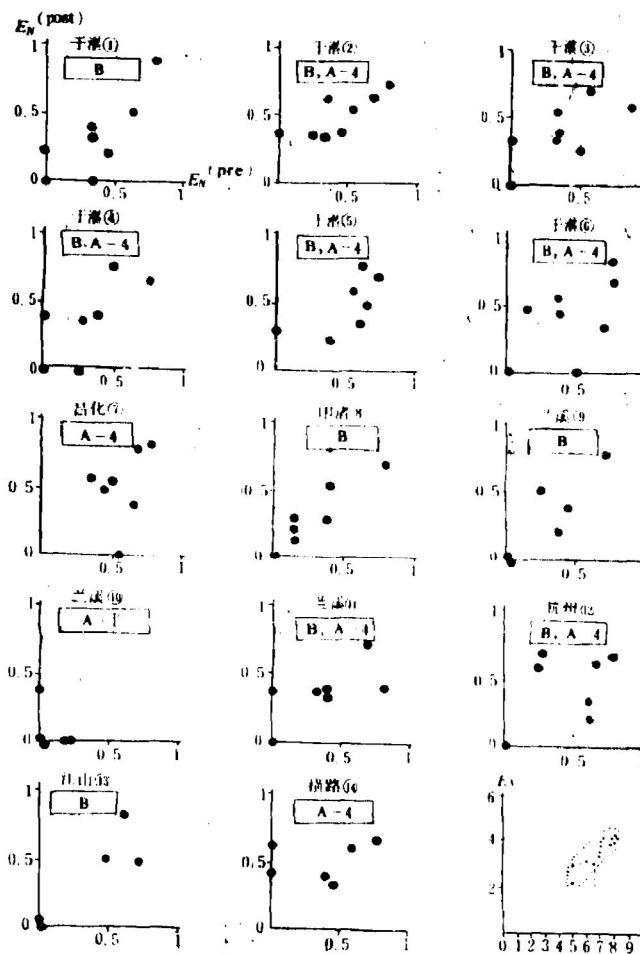


图5 浙西复理石的 $N-E_s$ 投影
 N —状态数, E_s —系统熵值
 ①最大熵, ②煤系地层,
 ③河流相、冲积扇, ④浅海
 相, ⑤复理石, ⑥最小熵,
 ⑦浙西复理石
 ○日本中部古生代剖面
 (Hattori, 1976)

图4 $E_N^{(pre)}-E_N^{(post)}$ 及 $N-E_s$
 坐标投影结果

在进行上述研究的同时，作者还进行了宏观沉积构造、微观沉积构造及生物沉积构造（痕迹化石）等方面的研究。诸方面的研究结果都证明该复理石形成于浅水环境，如：①各种类型的浪成波痕，②交错层理及纹理，③透镜状砂质夹层或潮汐层理，④浅水痕迹化石组合等……。上述现象的广泛存在从不同的侧面表明了浙西复理石的浅水性，与模拟结果完全一致。

该项研究证明沉积层序的马尔可夫链模拟确实为一种研究沉积作用的有效方法，尤其是用于盆地的区域对比更为有效且简便易行，值得推广。当然，状态数 N 的多少会对模拟结果有所影响，尤其是熵值与 N 的关系更大。因此野外取样时确定、划分状态的标准及测量精度等对模拟结果都有影响。这就要求研究者们充分理解沉积学原理，建立统一的取样标准，减少人为因素影响。这是正确进行计算、模拟的重要前提。

参 考 文 献

- [1] Вистелиус, А.Б., 1980, АН СССР, Ленингр., 389с.
- [2] Schwarzscher, W., 1972, in Daniel F. Merriam (ed.), *Mathematical models of sedimentary process*, London, Plenum, 271p.
- [3] Decey, M.F. and Krumbein, W.C., 1978, in J.M. Cubitt and S. Henley (ed.), *Statistical analysis in geology*.
- [4] Hattori, I., 1973, *Sedimentology*, Vol. 20, p. 331—345.
- [5] ———, 1976, *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, Vol. 8, No. 4, p. 477—497.
- [6] Harbaugh, J.W. and Bonham—Carter, G.F., 1970, *Computer simulation in geology*. John Wiley & Sons, New York.
- [7] 关尹文等, 1959, 地质学报, 第39卷, 第2期。
- [8] 夏邦栋, 1963, 南京大学学报, 第1期。
- [9] 李继亮等, 1978, 地质科学, 第1期。

MARKOV CHAIN SIMULATION ON FLYSCH RHYTHMIC SEQUENCES OF THE UPPER ORDOVICIAN IN WEST ZHEJIANG

Lü Hongbo Xia Bangdong
(Department of Geology, Nanjing University)

Abstract

The Early Paleozoic sedimentary basin in western Zhejiang was a wedge-shaped basin with a total area of 2000 km². In the later Ordovician, a flysch formation of 1000–2000 m thick developed in the basin.

Based on the grain sizes of the sediments, patterns of beddings, bedding plane feature and grading, 8 states are selected. All data mentioned above are calculated by computer. The matrixes of frequency transition, probability

transition, limit probability, replacement and fixed vectors and entropies are resulted respectively. The results show that the flysch basin in the western Zhejiang can be obviously divided into two longitudinal sedimental zones, the south east zone was a littoral area, and the northwest zone was the axis of a long and narrow basin. The hydrodynamic scale of the later was bigger and more complicated than the first one. The entropy types and the projections of systematic entropy values have further improved the shallow-water origin of the flysch.

西南石油地质局在复杂地区油气勘探中取得重要进展

“六五”期间,西南石油地质局组织了上扬子区(主要是四川盆地,含贵州大部、云南东部)复杂地形地质条件下油气勘探方法技术攻关,建立了一套完整的达到国内外先进水平的山区复杂构造的地球物理勘探方法技术系列,从而取得了准确、丰富的地下地质信息,为加深对四川盆地油气分布规律的认识,正确评价其含油气远景,提供了科学依据。

四川山区地形条件复杂多变,勘探难度甚大。该局的物探队伍,运用多道数字地震仪,成功地将宽线地震剖面测量和面积三维地震测量方法引进山区研究复杂的地腹构造,实现了地震数据采集、资料处理数字化。在川西龙门山的大型推覆体下,发现有利于油气储集的潜伏隆起。在川中完成5条区域大剖面,全长1780km,控制面积120000km²,获得全套海相沉积层系资料,据此绘制成古地质图,为重新认识四川盆地和川中隆起的地质结构及其形成和演变,提供了可靠依据。从1981年以来,该局在四川共进行近万公里的地震剖面测量,发现和查明62个构造,总圈闭面积864km²;还复查构造35个,总圈闭面积574km²。

丰富的地质资料表明,四川盆地成油气地质条件优越,已探明的天然气储量仅占资源量的10%左右。川西(成都平原)的含油气致密砂岩分布广、储量大,已发现70个构造,并钻成一批工业气井;在川北圈定了石龙场-八角场油气富集带,打出了一批工业油气井,已有12口井产油气,阆中、南部地区可形成进一步勘探石油的有利地区;川东北有很多隐伏构造和很好的石膏盖层,查明了一批圈闭,达县、宣汉、涪阳坝,华蓥山北端,均是有希望的地区,通江、南江、巴中一带初步证实有大型背斜构造,已打出较好的工业气流,可望有更大的发现。

(伍惟恭)