

# 马尔柯夫链法在建立沉积相模式中的应用

朱筱敏 信荃麟

(华东石油学院)

**内容提要** 本文采用统计学中的马尔柯夫链方法来建立地方性相模式,介绍了马尔柯夫链建立相模式的过程,并对惠民凹陷沙河街组三段的三角洲和深水浊积扇进行了分析研究。实践证明,马尔柯夫链法特别适用于具大量资料的韵律性碎屑岩地层剖面的相模式建立,并且是一种简化复杂地层序列、反映沉积物沉积规律的行之有效的办法。

**主题词** 马尔柯夫链 三角洲 浊积扇相模式

**第一作者简介** 朱筱敏 男 26岁 硕士 石油地质

通过研究岩性、沉积构造序列及其它相标志,将复杂地层序列简化为能反映沉积物沉积规律的简单形式,即归纳出一种地方性沉积相模式,用于和已知标准相模式进行对比,探讨沉积相的类型及其沉积特征,这在沉积相研究中是非常重要的、有意义的。通常,建立相模式的方法是通过研究地层剖面中的各种相标志及其组合,经逻辑抽象总结出一种简化的相序来反映整个地层剖面的沉积特征。然而,由于不同学者思维方式的差异和观察侧重点的不同,从而用上述方法作出的地方性相模式会有较多的差异,甚至对同一地层剖面的观察也是如此。为了更好地发挥沉积相模式在沉积相研究中的作用,利于不同学者之间的交流,人们应该使用一种科学的方法建立地方性沉积相模式,以排除思维方式差异带来的影响。统计学方法为人们开辟了一条新路,它特别适用于具有大量资料的韵律性碎屑岩地层剖面的沉积相模式建立。Reading和Walker(1965)较早使用了统计学方法来确定不同沉积相的垂向组合关系,建立地方性的沉积相模式<sup>[1]</sup>。后来许多学者<sup>[2]</sup>(A. W. Read, 1969; V. G. Ethier, 1975; S. G. Driese, 1984)发展了统计学理论在沉积相研究中的应用,将概率统计学中的马尔柯夫链应用于沉积相模式的建立。本文通过研究惠民凹陷西部下第三系沙河街组三段的十一口取心井和近三百口的钻测资料,确定出临盘三角洲和商河深水浊积扇等沉积环境。这两类砂体在岩性、沉积构造、粒度、电性和古生物组合诸方面均具有不同的特征。为了更好地反映三角洲和深水浊积扇的沉积特征,笔者采用了马尔柯夫链法对三角洲和深水浊积扇沉积剖面进行分析、归纳,总结出反映它们沉积规律的地方性相模式。

## 一、马尔柯夫链法建立相模式的步骤

首先仔细分析所观察的地层剖面或岩心剖面, 依据各种相标志, 确定出具不同沉积特征的相及其相互关系, 建立相变关系图, 说明相变规律。

第二步是统计出相变总数及某一种相变化为另一种相的次数, 建立相变数矩阵。根据马尔柯夫链定义,  $i$ 相转变为 $j$ 相的概率 $P_{ij}$ 为:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}/N}{\sum_{j=1}^M n_{ij}} = \frac{n_{ij}}{M \sum_{j=1}^M n_{ij}} \quad (1)$$

其中,  $N$ : 相变总数,  $n_{ij}$ :  $i$ 相转变为 $j$ 相的次数,  $M$ :  $i$ 相转变为 $j, j+1, j+2 \dots$ 相的总次数。

根据公式(1)求出实际观察的相变概率。

第三步是根据所有相变均是随机的假设, 求出随机序列的相变概率 $r_{ij}$ ,  $r_{ij}$ 的求法为:

$$r_{ij} = \frac{n_j}{N - n_i} \quad (2)$$

其中,  $n_i$ :  $i$ 相出现的次数,  $n_j$ :  $j$ 相出现的次数。公式(2)既可适用于连续相序, 也可适用于含有断层以及被掩盖部分层段的相序。从而求出随机序列相变概率矩阵。

第四步求出观察相变概率和随机相变概率的差矩阵, 即 $P_{ij} - r_{ij}$ 。显然, 此差值的可能范围是 $1 - 1$ 。差值为正值意味着观察到的相变比随机相变常见, 差值为负值意味着观察到的相变比随机相变少见。

第五步是选取观察相变概率与随机相变概率差值为正值的某一个数作为门坎值, 舍掉差值小于门坎值的实际观察相变, 作出差值大于门坎值的简化相序图。

最后根据第五步作出的简化相序图中表示的相变次序以及相之间的接触关系, 考虑地层的厚度即可作出能反映地层剖面沉积规律而又简化了的地方性相模式。

## 二、三角洲沉积特征及其相模式的建立

### 1. 三角洲沉积特征

沿盆地轴向延伸的临盘三角洲位于惠民凹陷西部临邑、盘河地区, 呈朵叶状向东延

伸,长达35公里。三角洲砂体沉积厚度较大,累厚达700余米,在垂向剖面上总体显示湖退序列。前三角洲和三角洲前缘质纯灰色泥岩和浅灰色粉砂岩、细砂岩构成厚8米左右的反韵律,频繁出现;三角洲平原浅灰色、灰绿色中砂岩、细砂岩、粉砂岩和易碎棕褐色泥岩、碳质页岩构成厚度1—4米的正韵律,它常位于前述反韵律之上,构成完整的三角洲复合韵律。

粉砂岩、细砂岩成熟度较低。石英含量50—60%,长石20—30%,岩屑10—20%,泥质5—10%,碳酸盐5—20%。结构成熟度较高,分选中等至较好,圆度中等。从三角洲平原往前缘方向泥质含量相对降低,碳酸盐含量相对增加,分选和圆度略变好,颗粒支撑结构。

粒度资料反映为特征的牵引流性质。概率图多为由悬浮、跳跃总体组成的双段式,反映河水和波浪相互作用的过渡带较发育,部分概率图包括三个总体的三段式和仅为悬浮总体的单段式,C-M图表现为QRS段,反映沉积物主要以递变悬浮方式搬运,部分呈均匀悬浮和跳跃、滚动方式搬运。

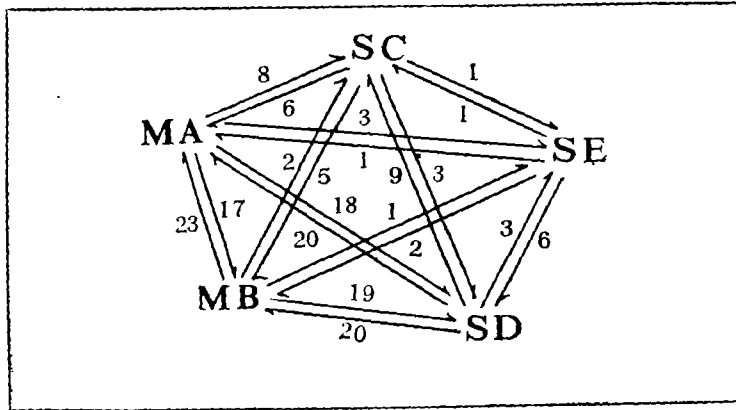
沉积构造类型多而丰富。前三角洲灰色泥岩中发育块状、水平层理;三角洲平原棕褐色泥岩、灰绿色泥质粉砂岩中发育透镜状、波状、脉状层理及植物根、铁质结核,碳质页岩中具丰富的植物屑及直立植物根。三角洲平原和前缘灰绿色粉、细、中砂岩中发育平行层理、槽状和板状交错层理、波状和上攀交错层理及波状层理;砂泥岩接触面上有反映河流作用的冲刷现象或接触面不平整的粒度突变,接触面之上砂岩中含有泥砾。另外还见有较多的变形层理、同生小断层及虫孔。与三角洲复合韵律相对应,上述沉积构造构成了有序的空间组合方式,反映了水动力条件的规律性变化。

化石种类多,含量丰富,深浅水化石均存在。介形虫多为完整的,有玻璃介、隐瘤华北介、伸长纺锤玻璃介、沼泽拟星介等。塔螺、平卷螺和蚌化石壳体完整或破碎,有的纹饰清晰。前三角洲环境中含有较多的较深水化石,如伸长纺锤玻璃介、鱼屑等。三角洲前缘和平原环境中含较多的浅水化石,如沼泽拟星介、蚌、螺等。

自然电位曲线形态单层呈齿化漏斗形、钟形、箱形和指形。组合形态多样,自下而上可为平直基线-漏斗形-箱形-钟形或指形,可见正向齿形的多次重复,其组合特征反映了三角洲前积的特点。

## 2. 应用马尔柯夫链建立三角洲沉积相模式

前文叙述了三角洲沉积特征,在此基础上笔者利用马尔柯夫链法对惠民凹陷临盘三角洲的沉积韵律进行分析、归纳。由于研究区取心井钻遇了三角洲的不同环境,也没有完全连续地对整个三角洲进行取心,因此笔者选取钻遇三角洲平原环境,岩心保存良好的盘45井来建立地方性沉积相模式。首先,根据对盘45井岩心的仔细观察,选择能反映沉积环境的五种岩性、构造标志,即浅灰色、灰绿色、褐色泥岩、碳质页岩,具植物根、铁质结核、透镜状层理(简称MA);灰绿色、棕色泥质粉砂岩,具水平层理、波状层理(简称MB);粉砂岩,具单向前积斜层理、波状交错层理、上攀交错层理和植物根(简称SC);粉、细、中砂岩,具植物根(简称SD);粉、细、中砂岩,具平行层理、槽状交错层理(简称SE)。根据上述五种标志的相互关系,确立相变关系图(图1),相之间无地层上的不整合,但可有突变现象。相变总数 $N=168$ ,建立观察到的相



数字表示相变次数

图1 惠民凹陷盘45井相变关系图

Fig.1 Relations between facies changes of Well 45 in Huimin Seg

变数矩阵(表1); 求出它的相变概率(表2); 依据公式(2)求出随机序列相变概率(表3)及观察相变概率与随机相变概率的差值(表4), 取门坎值为0.04, 舍掉差值小于0.04的观察序列相变, 建立比随机更常出现的简化了的相变关系图(图2)。据此相变关系图, 考虑相之间的接触关系及厚度作出反映三角洲平原沉积特征的地方性相模式(图3)(也可为SE、SD、SC、MA序列模式)。此模式与前人所作的进积型三

表1 观察序列相变数矩阵

Table 1 Matrix for the number of facies change in observed sequence

N = 168	MA	MB	SC	SD	SE
MA		17	8	18	3
MB	23		2	19	1
SC	6	5		3	1
SD	20	20	9		3
SE	1	2	1	6	

表2 观察序列相变概率

Table 2 Probability of facies change in observed sequence

	MA	MB	SC	SD	SE
MA		0.370	0.174	0.391	0.065
MB	0.511		0.044	0.422	0.022
SC	0.400	0.333		0.200	0.067
SD	0.385	0.385	0.173		0.057
SE	0.100	0.200	0.100	0.600	

角洲相模式中的平原部分在岩性、韵律、沉积构造诸方面均相当，但厚度薄些。然而此模式又具其特点，它除了反映三角洲进积之外，还反映三角洲平原环境中微相的平面横向迁移特征。

表3 随机序列相变概率

Table 3 probability of facies change in random sequence

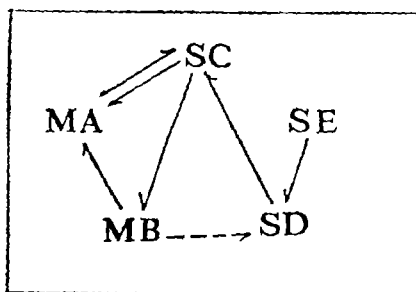
	MA	MB	SC	SD	SE
MA		0.38	0.12	0.43	0.08
MB	0.37		0.12	0.42	0.08
SC	0.30	0.29		0.34	0.07
SD	0.40	0.39	0.13		0.09
SE	0.29	0.28	0.09	0.33	

表4 观察与随机序列相变概率差值

Table 4 Difference of facies change probability between observed and random sequence

	MA	MB	SC	SD	SE
MA		-0.01	0.05	-0.04	-0.02
MB	0.14		-0.08	0.002	-0.06
SC	0.1	0.043		-0.14	-0.003
SD	-0.02	-0.01	0.04		-0.03
SE	-0.19	-0.08	0.01	0.27	

MA、MB、SC、SD、SE示不同的相（见正文）


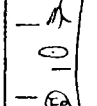


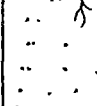



实线：表示比随机更常出现的相变

虚线：表示比随机略常出现的相变

图2 比随机更常出现的相变关系图

Fig. 2 Relations between facies change more frequently than random facies change

厚度 cm	模式	代号
23   80		BA
30   301		MA
21   169		MB
23   80		SC
30   400		SD
30   158		SE

MA. 泥岩，碳质页岩，较破碎，透镜状层理，植物根、铁结核（沼泽）  
 MB. 泥质粉砂岩，水平层理，波状层理（决口扇）  
 SC. 粉砂岩，单向前积斜层理，上攀层理，波状交错层理（天然堤）  
 SD. 粉砂岩，细砂岩，中砂岩，胶结疏松，偶见植物根（分支河道侧翼）  
 SE. 粉、细、中砂岩，平行层理，槽状交错层理（分支河道）  
 注：BA应为MB

图3 三角洲平原沉积相模式

Fig. 3 Sedimentary facies model of the delta plain

### 三、深水浊积扇沉积特征及其相模式建立

商河深水浊积扇位于惠民凹陷西部的商河地区，即临盘三角洲的前方。深水浊积扇单个扇体呈不规则椭圆状，面积10—20平方公里，其长轴平行三角洲沉积走向。单个扇体的迭合形成裙带状复合体，面积可达100平方公里。岩性为频繁薄层间互的浅灰色、灰褐色泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩和深灰色泥岩。细、粉砂岩和暗色泥岩构成众多的正韵律。韵律厚度变化较大，为0.5—5.5米。不同韵律中砂泥厚度比不同，变化范围为1：15—10：1，反映了浊流在不同沉积时期发生频度不同。

浅灰色粉、细砂岩成熟度较低，石英含量40—60%，长石15—30%，岩屑5—25%，泥质10—20%，碳酸盐很少。多为泥质支撑的孔隙-基底式胶结，可见细砂到粉砂的递变层理和混杂结构。分选较好—较差，圆球度中等。

粒度资料显示浊流沉积特征。概率图主要有二种类型。一种为两段式，它的显著特点是悬浮总体含量高（70—90%），粒度区间宽（2—4.2 $\phi$ ）；另一种是大量出现的由悬浮总体组成的单段式，反映了沉积物呈递变悬浮方式搬运的快速沉积。C-M图为平行C=M基线的QR段。

包玛序列发育。浅灰色细、粉砂岩和泥岩构成包玛序列。A段为块状或递变层理的粉、细砂岩，含有顺层或竖立分布、磨圆较好的棕褐色泥砾，其内可见水平纹层；B段平行纹层由粒度差异或碳屑定向排列显示，也可含有棕褐色泥砾；C段粉砂岩中发育变形层理、包卷层理和小型波状层理；D段灰褐色泥岩、泥质粉砂岩中具水平层理；E段为深灰色质纯泥岩。包玛序列组合类型有ABCDE、ABE、AE、BCE等。序列中

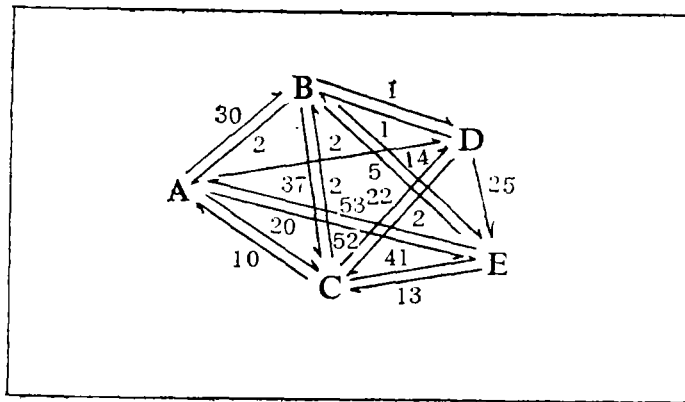
每段单元厚度变化较大。A段1—30厘米，B段2—14厘米，C段1—10厘米，D段1—4厘米，E段一般1—10厘米。

砂岩底部发育多种类型的底面印痕，如槽模、纵向沟脊、多种工具作用形成的工具痕。负载、滑塌构造等准同生变形构造十分发育。泥岩及泥质粉砂岩中可见水平虫孔、生物爬迹和生物扰动现象。未见出露水面的构造标志。

生物化石种属单调、数量少。浅水化石小旋螺、博兴假玻璃介、沼泽拟星介和深水化石伸长纺锤玻璃介等共生。还有少数鱼屑和植物屑。

具典型的浊流沉积电性特征。在暗色泥岩平直基线的背景上夹有齿化的箱形、齿化的钟形、指形，构成厚度不一、频繁出现的正韵律。

前已叙及商河深水浊积扇的沉积特征，在此笔者选取钻遇商河深水浊积扇的商13-351井岩心作为建立地方性相模式的地层剖面，并选取能反映深水浊积扇沉积特征的 五种岩性、沉积构造标志，即含泥砾的块状粉、细砂岩，其底和下伏层突变接触，可具递变层理(简称A)；具平行纹层的粉、细砂岩(简称B)；具变形、包卷、波状层理的粉、细砂岩(简称C)；具水平层理的泥质粉砂岩(简称D)；深灰色泥岩、页岩，可具水平层理(简称E)。通过仔细观察描述商13-351井的岩心，建立了上述五种相之间的相变关系图(图4)，相之间可有突变，但无地层上的不整合，相变总数 N=332。然后建



数字表示相变次数

图4 惠民凹陷商13-351井相变关系图

Fig. 4 Relation between facies change of S13-351 in Huimin Seg

立观察序列的相变数矩阵(表5)；求出观察序列相变概率(表6)；据公式(2)求出随机相变序列的相变概率(表7)及观察相变概率与随机相变概率的差值(表8)。取此差值0.046为门坎值，舍掉差值小于0.046的实际观察相变，作出相变概率差值大于门坎值的比随机更常出现的相变关系图(图5)。据此图考虑每个单元的厚度和接触关系，作出反映深水浊积扇沉积特征的地方性相模式(图6)(或作或ABCDE序列模式)。此模式便是著名的包玛序列，表明用马尔柯夫链法对少数地层剖面进行分析能够得到与大量地层剖面进行抽象、归纳得到的相同结果，客观地反映了浊流沉积特征。

表 5 观察序列相变数矩阵

Table 5 Matrix for the number of facies change in observed sequence

N=332	A	B	C	D	E
A		30	20	2	53
B	2		37	1	14
C	10	2		22	41
D		1	2		25
E	52	5	13		

表 6 观察序列相变概率

Table 6 Probability of facies change in observed sequence

	A	B	C	D	E
A		0.286	0.190	0.019	0.505
B	0.037		0.685	0.019	0.259
C	0.133	0.027		0.293	0.547
D		0.036	0.071		0.893
E	0.743	0.071	0.186		

表 7 随机序列相变概率

Table 7 probability of facies change in random sequence

	A	B	C	D	E
A		0.24	0.33	0.12	0.31
B	0.38		0.27	0.10	0.25
C	0.41	0.21		0.11	0.27
D	0.35	0.18	0.25		0.23
E	0.401	0.21	0.29	0.11	

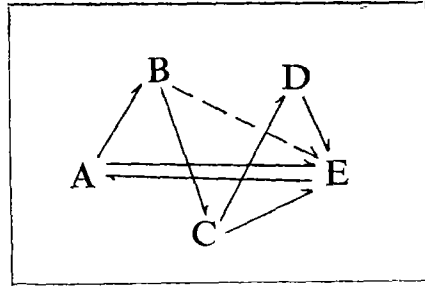
表 8 观察与随机序列相变概率差值

Table 8 Difference of facies change probability between observed and random sequence

	A	B	C	D	E
A		0.046	-0.14	-0.10	0.195
B	-0.343		0.415	-0.08	0.009
C	-0.277	-0.183		0.183	0.277
D	-0.35	-0.144	-0.179		0.663
E	0.342	-0.139	-0.104	-0.11	

A, B, C, D, E 示不同的相 (见正文)





实线：表示比随机更常出现的相变 虚线：表示比随机略常出现的相变

图5 比随机更常出现的相变关系图

Fig. 5 Relation between facies change more frequently than random facies change

厚度 cm	模式	代号
1-10	—	E
1-4	—	D
10	波浪状交错层理	C
2-14	平行层理	B
1-30	块状层理	A

- A. 粉砂岩、细砂岩，含有磨圆较好的棕褐色泥砾，块状层理，递变层理。
- B. 粉砂岩、细砂岩，由碳屑或砂粒变化显示平行层理，见棕褐色泥砾。
- C. 粉砂岩、泥质粉砂岩，波状交错层理，单向前积斜层理，滑塌构造，包卷层理。
- D. 具水平纹层的泥质粉砂岩。
- E. 质纯块状暗色泥砾。

注：厚度10应为1-10

图6 深水浊积扇沉积相模式

Fig. 6 Sedimentary facies model of deep-water turbidite fan

工作中得到胜利油田临盘地质所等单位 and 个人的帮助与支持，谨致谢意。

收稿日期 1985年9月16日

参 考 文 献

[1] R.G. 沃克编，1983，沉积相模式，项仁杰等译，地质部情报研究所出版。  
 [2] S.G. Driese and R.H. Dott, JR, , 1984, AAPG Bull, V.68, N.5, p.574-597.

## APPLICATION OF MARKOV CHAIN METHOD TO ESTABLISHMENT SEDIMENTARY FACIES MODEL

Zhu Xiaomin

(The graduate School of Beijing, East China Petroleum Institute)

Xin Quanlin

(East China Petroleum Institute)

### Abstract

Observed the cores from 11 wells and the loggings from approximate 300 wells in 3rd Member of the Lower Tertiary Shahejie Formation in the west Huimin seg, and analyzed sedimentary facies, Linpan Delta and the Shanghe deepwater turbidite fan and other sedimentary environments were determined. Linpan Delta and the Shanghe turbidite fan have a lot of different characteristics in lithology, sedimentary structure, grain size, logging, and paleontological assemblage etc.

The lobate Linpan Delta Paralleled the axis direction of Huimin seg, 35 kilometers in length, over 700 meters in accumulating thickness. The delta displays a reverse cycle on the whole vertical section. The reverse rhythm of the predelta and delta front consisted of grey mudstone and light grey siltstone, fine grained sandstone, about 8 meters in thickness, and appeared frequently; the normal rhythm of the delta plain consisted of light grey, and greyish green siltstone, fine grained sandstone, medium grained sandstone and brown mudstone, carbonaceous shale, 1-4 meters in thickness. The normal rhythm often overlies the reverse one, constituting a complete delta composite rhythm. The maturity of sandstone composition is lower, the content of quartz 50-60%, feldspar 20-30%, rock fragment 10-20%, clay 5-10%. The maturity of its texture is higher, moderate-well sorted and grain supported texture. The grain size data indicate the feature of typical drawing-current. The probability graphs of the delta are two-lines which consists of suspension and saltation populations, CM diagram consists of segment QRS. There are many types of sedimentary structures, such as cross bedding, parallel stratification, and vegetable foot etc. The vertical sequence of the sedimentary structures reflects the delta progradation towards lake centre. paleontological assemblages, SP curves and seismic sections all show the existence of the Linpan delta.

The Shanghe deep-water turbidite fan is located in the front of Linpan Delta, irregular oval in shape, smaller in size, the area is about 10-20 km<sup>2</sup>. The frequent

interbedded light grey, greyish brown muddy siltstone, siltstone, fine grained sandstone, and deep grey mudstone constituted a lot of normal rhythms, 0.5-5.5 meters in thickness. The maturity of the sandstone composition is relatively low, the content of quartz 40-60%, feldspar 15-30%, rock fragment 5-25%, clay 10-20%, having mud supported, pore-matrix cementation. The information of grain size shows the characteristic turbidite sedimentation, probability graphs are single line, CM diagram appears segment QR paralleled to C=M base line. The complete incomplete Bouma sequences and many kinds of base prints were developed. The deep and shallow fossils were associated, their types were monotonous and a few in quantity. There are many typical electric loggings and seismic responses of the Shanghe turbidite fan.

In order to establish a local facies model quickly and accurately, and play a role in facies studying, to eliminate some artificial influence, and to favor the dialogue between geologists, in this paper authors used the Markov chain to determine vertical relationship of the sedimentary sequence of the Linpan delta and the Shanghe deep-water turbidite fan and to establish the local facies models. Practice has indicated that the Markov chain is an effective method to establish local facies model, and it is suitable for rhythmical complex stratigraphic sequence. The steps of Markov chain established facies model are following; 1. Observe stratigraphic section carefully, based on a variety of facies marks, determine facies with different characteristics and their relationship plotted relation diagram of facies change; 2. Count the whole number of facies changes and the number of facies changes from one into another, establish the matrix of facies change number,

determine facies change probability of sequence; observed  $P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^M n_{ij}}$  3. Fix the

facies change probability of random sequence;  $r_{ij} = \frac{n_j}{N - n_i}$  4. Determine the difference of facies change probability between the observed and random sequences,  $P_{ij} - r_{ij}$ ; 5. Choose a suitable difference of facies change probability between the observed and random sequences as critical value, eliminate some observed facies changes whose difference is less than the critical value, establish a simplified map of facies change relation; 6. According to the simplified map of facies change, develop a simplified local sedimentary facies model which can show sedimentary regularity of the stratigraphic sequence, considering stratigraphic thickness.