

Fischer 图解及其沉积响应的计算机模拟^{*}

——以泌阳断陷下第三系核三上段为例

胡受权 陈国能

(中山大学地球科学系, 广州 510275)

王英民 童崇光

(成都理工学院石油系, 成都 610059)

泌阳断陷下第三系核三上段包括三个跨时分别为 1.08, 1.40, 1.02 Ma 的陆相层序, 在双河-赵凹地区表现为冲积扇-扇三角洲-湖相沉积体系配置。在这三个陆相层序中, 共发育 13 个小层序组, 其中可识别的小层序达 50 多个; 其内部沉积微相达 10 余种。据此, 采用 Fischer 图解法, 求取了其可容空间变化速率曲线。在此基础上, 采用自行研制的定量层序地层模拟系统, 模拟了研究区下第三系核三上段沉积时期, 可容空间变化过程与陆相层序响应特征。研究结果表明: 泌阳断陷湖盆双河-赵凹地区下第三系核三上段的三个陆相层序, 均为高匀速物源供给条件下形成的, 其中 S4 层序的水进体系域, 应列为该区油气勘探的重要目标层段。

关键词 Fischer 图解 陆相层序 过程-响应 模拟 泌阳断陷

第一作者简介 胡受权 男 34 岁 副教授(博士后) 油气田地质学及层序地层学

1 层序划分

层序是层序地层学的基本单位和研究重点, 延时 0.3~3 Ma^[1]。Maill 等人^[2,3]认为, 大多数层序都是由构造因素所造成的。泌阳断陷湖盆中的陆相层序起因于盆缘主干控盆边界断裂构造脉动性及湖平面波动性所引起的可容空间旋回^[4], 一个陆相层序对应于一个显著的可容空间旋回^[5]。

泌阳断陷下第三系核三上段(以下简称核三上段)可划分为三个陆相层序(S4, S5 和 S6)^[6], 除 S6 顶界 T₄ 反射面为沉积间断面(即陆上暴露面)外, 其它层序界面皆为沉积相不连续面(界面上下具显著的“跳相”现象), 测井曲线上显示电性突变特征。在高分辨率的三维地震剖面上可清晰地见到层序界面之下的局部削截现象, 层序界面之上的上超现象亦较为普遍, 因为该三个层序均缺乏低水位体系域, 在层序界面上直接覆盖着水进体系域。三个陆相层序跨时分别为 1.08, 1.40, 1.02 Ma^[6]。

研究区下第三系核三上段所包括的三个陆相层序(S4, S5, S6), 从南往北呈现冲积扇-扇三角

洲-湖泊-三角洲的沉积体系空间配置。其中, 在双河-赵凹地区表现为冲积扇-扇三角洲-湖相沉积体系配置^[7]。就其中的一个陆相层序而言, 因其下部缺乏低水位体系域, 从水进体系域、高水位体系域到水退体系域, 具体表现为冲积扇-退积型扇三角洲-湖相-进积型扇三角洲-冲积扇沉积体系配置。因而在一个陆相层序中, 应发育两套有利油气储集的砂砾体, 即早期水进型砂砾体及晚期水退型砂砾体。在不同的陆相层序中, 这两套砂砾体的发育程度不一。

在研究区核三上段的三个陆相层序中, 发育低位加积型、进积型、高位加积型及退积型四类小层序组计 13 个; 其中可识别的小层序达 50 多个, 其内部沉积微相达 10 余种^[6]。

2 模拟方程和计算机实现

2.1 模拟方程

在 Waltham 等人所提出的层序地层模拟方程式的基础上^[8,9], 综合考虑陆源碎屑物供给、内源碳酸盐岩沉积、沉积物侵蚀与再沉积、重力流沉积以及构造升降和水平位移等诸多地质因素, 建立了一个能够模拟各型盆地的、统一的综合数学物理方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} = (P - W) + \frac{\partial F}{\partial X} + (S_0 cZ - E) + \frac{\partial G}{\partial X} + [v - u(\frac{\partial h}{\partial X})]$$

^{*} “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室开放基金项目(编号: PLN97023)成果之一。

式中 h 为距离初始界面的高度(m); t 为时间(Ma); P 为内源碳酸盐岩原地生长速率(m/Ma); W 为内源碳酸盐岩侵蚀速率(m/Ma); F 为陆源碎屑物注入通量(m^2/ka); X 为与初始位置(相当于滨线位置)的水平距离(km); S_0 为与悬浮沉积物负载成正比的沉积常数(Ma^{-1}); c 为悬浮沉积物在水中的分布程度(悬浮沉积物厚度/水深); Z 为与悬浮沉积物搬运、沉积有关的水深(m); E 为水下侵蚀速率(m/Ma); G 为重力流沉积物注入通量(m^2/ka); v 为初始界面沿水平方向上的位移速率(m/Ma); u 为初始界面沿垂直方向上的升降速率(m/Ma)。

2.2 参数的地质意义

2.2.1 ($P-W$)项

参数 P , W 分别代表了内源碳酸盐岩原地生长速率和侵蚀速率, 它们均为水深的函数。因为不同的水深表示着碳酸盐岩台地不同的位置, 故其生长速率有差异。在水深为负值时(即台地露出水面), 碳酸盐岩接受淋滤、风化等侵蚀作用。($P-W$)项表征了内源碳酸盐岩对界面高度 h 的贡献。

2.2.2 $\partial F/\partial X$ 项

$\partial F/\partial X$ 代表陆源碎屑沉积物通量 F 在水平方向 X 轴上的变化率, 用于描述陆源碎屑物对界面高度 h 的贡献。应该说明的是, 因为该方程式为二维层序地层模拟模型, 即包含水平方向上沉积物位移(X)及垂直方向上沉积物高度(h)的二维沉积层序模拟, 所以方程式中陆源碎屑物注入通量 F 采用单位时间内陆源碎屑物所堆积的面积来衡量(m^2/ka)。

2.2.3 (S_0cZ-E)项

无论是内源碳酸盐岩沉积物或陆源碎屑沉积物, 在浪基面以上的浅水区, 均可能遭受水下侵蚀, 产生细粒悬浮沉积物, 在水动力作用下搬运到较深水区发生再沉积。(S_0cZ-E)项可解释为细粒悬浮沉积物的净沉积速率等于细粒悬浮沉积物的沉积速率(S_0cZ)减去水下侵蚀速率(E), 即反映了经水下侵蚀作用而发生再搬运、再沉积的细粒悬浮沉积物对界面高度 h 的净贡献。

2.2.4 $\partial G/\partial X$ 项

$\partial G/\partial X$ 项表示沉积物在水平方向 X 轴上的下滑梯度, 它是由重力作用引起的, 与水下侵蚀作用无关。它可用于描述沉积物向斜坡下倾方向移动的过程, 表征重力流沉积作用对界面高度 h 的贡献。鉴于与陆源碎屑物注入通量 F 相同的原因,

重力流沉积物注入通量 G 的单位亦为 m^2/ka 。

2.2.5 [$v-u(\partial h/\partial X)$]项

u 指初始界面沿水平方向上的位移速率, v 是初始界面垂直升降的速率。当界面上的某一点沿一定的角度 $\partial h/\partial X$ 发生位移时, 就会产生垂向升降分速率 [$v-u(\partial h/\partial X)$]。该项可用于反映构造运动及压实作用对界面高度 h 的贡献。

2.3 计算机实现

本文采用自行研制的定量层序地层模拟系统, 对泌阳断陷湖盆双河-赵凹地区下第三系核三上段沉积层序进行了模拟, 为探讨陆相层序过程-响应机制提供依据。

研究区属陆源碎屑岩盆地, 故其模拟方程式中第一项 ($P-W$) 项可不予考虑, 方程式应为 $\partial h/\partial t = \partial F/\partial X + (S_0cZ-E) + \partial G/\partial X + [v-u(\partial h/\partial X)]$ 。

该模拟方程式的计算机实现过程参见图 1。

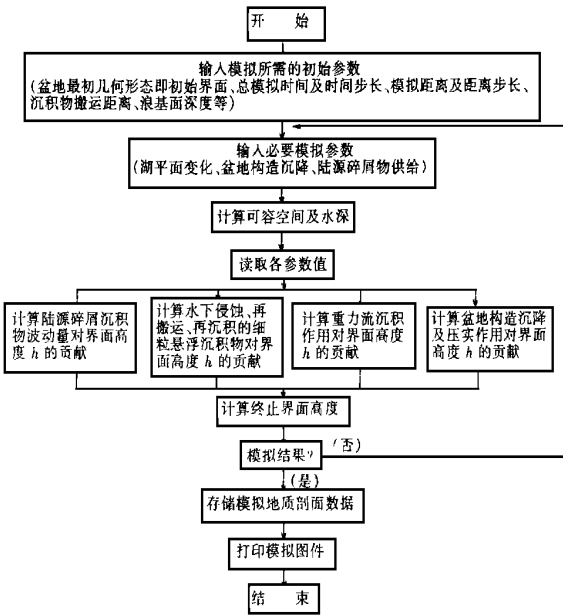


图 1 计算机模拟流程图

Fig. 1 Flow chart of computer simulation

3 核三上段陆相层序形成过程的计算机模拟

3.1 Fischer 图解

Fischer 图解是 Fischer 在研究奥地利三叠纪湖坪相灰岩剖面时首先提出来的, 一般适用于沉积时没有长时间的水深变化(即发育补偿性沉积作用)地区^[10]。泌阳断陷湖盆双河-赵凹地区, 因毗邻湖盆陡岸, 物源充足, 基本上可用 Fischer 图解求取其

实际可容空间变化曲线。

在绘制 Fischer 图解时, 纵坐标为平均厚度累积偏移, 横坐标为旋回数^[10]。亦即, 将旋回层序单元的厚度减去所有旋回层序单元的平均厚度后可得到该旋回层序单元的净加积量, 以该旋回层序单元前面所有旋回层序单元净加积量累积值为纵坐标的起点, 画在以旋回数为横坐标的图解上。图解中各旋回顶点坐标连线即为以旋回数为函数的平均厚度累积偏移曲线(图 2), 它代表了沉积物形成时的实际可容空间, 此即为 Fischer 图解。

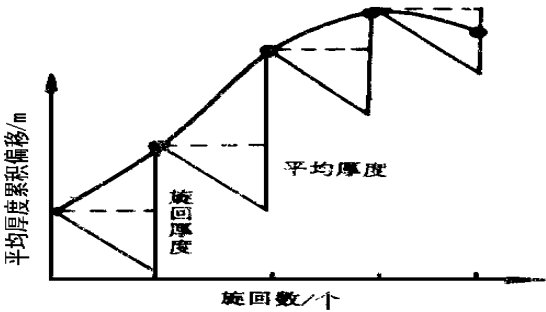


图 2 Fischer 图解法图示^[10]

Fig. 2 Sketch map of Fischer diagram method

绘制 Fischer 图解时应考虑两个问题: 其一, Fischer 图解法要求地层剖面以旋回层序单元为基本单位, 据 Sadler 等人^[10]证明, 在旋回数大于 50 个的地层剖面上, 即使不同的人所划旋回数有些差异, 但图解的基本特征不会有太大变化; 其二, Fischer 图解法要求旋回层序单元厚度应为沉积时的厚度, 以便真实地反映出沉积物实际可容空间变化, 故对砂泥岩剖面应进行必要的压实校正。

本文将研究区目的层段的砂泥岩剖面划分出 53 个旋回小层序, 并根据孔隙度-深度关系对各旋回小层序厚度进行压实校正, 获得各小层序原始厚度。

各小层序的原始厚度计算有一个基本假设, 即沉积物在压实过程中, 其固体颗粒不可压缩, 也不与外界有物质交换。造成沉积物孔隙度和厚度减小的

原因是孔隙中的流体不断被排出。

首先根据测井和声波测井资料建立研究区的 $\Phi-Z$ 关系式为

$$\Phi_{\text{泥}} = 0.66 e^{-8.15 \times 10^{-4} Z} \quad \Phi_{\text{砂}} = 0.41 e^{-4.34 \times 10^{-4} Z}$$

其次根据每一小层序中各种岩性百分比(b_i), 计算出该小层序的平均厚度与深度之间的关系式: $\overline{\Phi}(Z) = b_1 \Phi_1(Z) + b_2 \Phi_2(Z) + \dots + b_i \Phi_i(Z) + \dots$ 。对于本研究区: $\overline{\Phi}(Z) = b_{\text{砂}} [\Phi_{\text{砂}}(Z) - \Phi_{\text{泥}}(Z)] + \Phi_{\text{泥}}(Z)$, 其中, $b_{\text{砂}}$ 为小层序中砂岩百分含量。

最后计算出各小层序原始厚度 H_i

$$H_i = \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} [1 - \overline{\Phi}(Z)] dZ$$

式中 Z_i, Z_{i+1} 分别为小层序 i 的顶、底界埋深(单位: m), 未脱压实校正厚度 $h_i = (Z_{i+1} - Z_i)$ (单位: m)。

求取各旋回小层序原始厚度后, 即可绘制 Fischer 图解曲线(图 3)。从图中可以明显看出, 研究区下第三系核三上段自底至顶基本上可分为三个完整且规模较大的实际可容空间旋回, 是三次显著的湖平面上升-下降旋回(即水进-水退旋回)及三次显著的盆缘边界断裂活动-静止旋回综合效应。结合其它地质资料, 可将其定为三个层序单元, 其跨时均为 1 Ma 以上, 相当于 Vail 等人^[1]所定义的三级旋回层序单元。从图中还可以看出, 研究区核三上段可进一步划分为 15 个次级旋回, 跨时 20×10^4 a 左右, 介于米兰柯维奇天文旋回的偏心率周期 ($10 \times 10^4 \sim 40 \times 10^4$ a) 之间, 与天文驱动的古气候变迁所引起的湖平面高频振荡有关, 可定为相当于 Vail 等人^[1]所定义的四级旋回层序单元——小层序组。根据实际资料分析研究, 在研究区的目的层段中, 可识别出 13 个小层序组, 这与 Fischer 图解结果基本上吻合。这在一定程度上显示了 Fischer 图解的客观性和实用性。

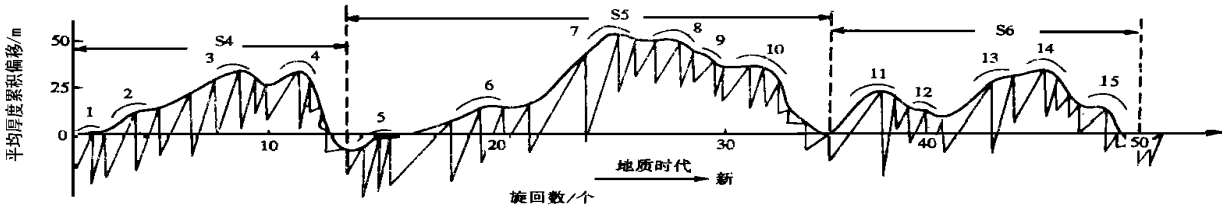


图 3 泌阳断陷双河-赵凹地区下第三系核三上段 Fischer 图解曲线

Fig. 3 Fischer diagram curves of the upper member of Eh₃ in Shuanghe-Zhao'ao area, Biyang faulted depression

3.2 陆相层序响应特征

通常,断陷湖盆陆相层序的形成和发育受湖平面变化、基底构造沉降、物源供给及古气候变迁等四大因素的控制^[11,12]。古气候因素往往通过影响湖平面波动及物源供给量,来控制陆相层序发育的几何构型及其界面特征。由此看来,断陷湖盆陆相层序的形成直接受控于湖平面变化、基底构造沉降及物源供给三者的协同作用。实际上,上述采用 Fischer 图解法求取的可容空间变化速率曲线,实为湖平面变化与基底构造沉降两者叠合的结果。因此,在此仅须讨论在不同物源供给速率的条件下,可容空间变化过程与陆相层序响应特征。

物源供给是陆相层序形成的一个重要因素。湖盆中沉积物的供给受物源区性质、构造运动及古气候变迁等因素所控制。物源区母岩的抗风化强度是决定物源供给量的重要因素。构造运动通常导致盆-山之间高差增大,加速物源区的风化剥蚀作用,提高物源供给速率。古气候变迁一方面影响物源区的风化剥蚀作用;另一方面影响河流流量的大小及搬运能力的强弱。在干燥、炎热气候条件下,物源区物理风化作用加剧,粗碎屑物源丰富;河流水量供给较小,湖平面相对较低,湖水浅且湖域窄。该条件下形成的陆相层序单元厚度较大,进积-加积作用显著。在温暖、潮湿气候条件下,物源区以化学风化作用为主,物源中细碎屑组分及化学组分占主导;河流水量充沛,流量大,湖平面相对较高,湖泊水体饱满且湖域开阔。该条件下形成的陆相层序单元

厚度不大,以加积-退积作用为其特色。

物源供给对陆相层序的影响,具体表现在沉积物供给速率的波动,对陆相层序构型及层序边界形成的影响方面。这一影响机理,取决于沉积物供给速率($V_{物}$)与盆地可容空间的变化速率($V_{可}$)之间的关系。根据研究区核三上段 Fischer 图解曲线,分别在高匀速($V_{物} > V_{可}$)、中等匀速($V_{物} \approx V_{可}$)和低匀速($V_{物} < V_{可}$)物源供给条件下,采用计算机定量模拟了研究区核三上段的陆相层序响应特征。

模拟结果表明,在中等匀速物源供给情况下,即 $V_{物} \approx V_{可}$,容易形成近补偿性沉积作用。因为 $V_{物}/V_{可} \approx 1$ 时,沉积物供给所引起的湖盆可容空间的减小,基本上与断陷湖盆可容空间的增加量相抵消。在这种条件下所形成的一个陆相层序单元,各体系域的地层叠置型式具有显著差异性,且特征明显。早期呈退积型式,中期为垂向加积型式,晚期则为进积型式。

在高匀速物源供给条件下, $V_{物} > V_{可}$,极易形成过补偿性沉积作用(图 4)。 $V_{物}/V_{可} > 1$ 意味着湖盆可容空间渐趋减小。湖泊水体收缩,湖水范围缩小、水深变浅。因而在一个陆相层序单元的各个体系域中都表现为进积-垂向加积型特征。

在低匀速物源供给条件下,即 $V_{物} < V_{可}$,则极易形成欠补偿性沉积作用。因为在 $V_{物}/V_{可} < 1$ 时,湖盆可容空间不断增加,湖泊水体逐渐扩张,湖水范围扩大及水深渐趋加深。因而在一个陆相层序单元的各个体系域中都表现为退积-垂向加积型

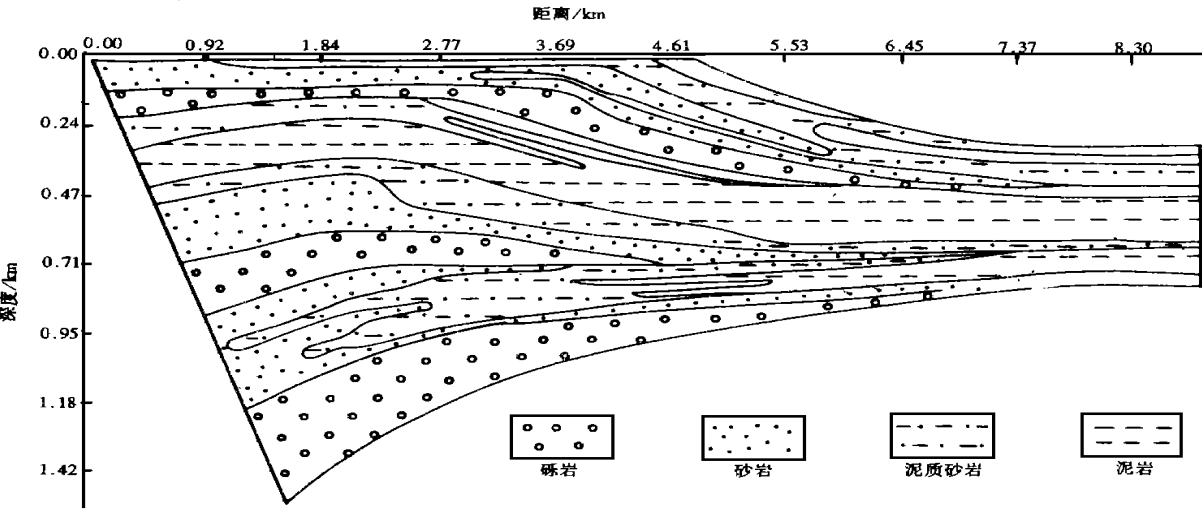


图 4 泌阳断陷双河-赵凹地区核三上段 Fischer 图解曲线的陆相层序计算机模拟(高匀速物源供给条件下)

Fig. 4 Computer simulation of terrigenous sequences based on Fischer diagram curves of the upper member of Eh3 in Shuanghe-Zha'ao area, Biyang faulted depression

特征。

高匀速物源供给条件下的计算机定量模拟结果(图 4)与实际地震剖面的反射结构特征(图 5)基本相近。这充分地显示了计算机模拟结果的客观性,亦有力地证实了本文所求 Fischer 图解曲线的准确性。另外,通过计算机模拟结果与实际资料对比研究可以推断,在下第三系核三上段沉积时期,泌阳断陷双河-赵凹地区的沉积物源供给十分丰富。这一结论与实际地质背景也是吻合的,因为研究区毗邻断陷湖盆陡坡带,距离源区近,物源充足。

计算机模拟结果及实际地震资料一致显示(图 4, 5),在研究区核三上段三个陆相层序的每一个层序单元中,早期水进型砂砾体规模较大,且呈沉积楔状体产出,厚度远较晚期水退型砂砾体为厚。因而,对于一特定的断陷湖盆陆相层序而言,水进体系域

往往是油气勘探最为有利的目标层段。就研究区下第三系核三上段的三个陆相层序(S4, S5, S6)来看,发育于 S4 层序的水进型砂砾体规模为最,其上又有高水位体系域的湖相泥岩封堵,对形成油气圈闭极为有利。因此,研究区下第三系核三上段 S4 层序的水进体系域,应列为该区油气勘探的重要目标层段。

4 结束语

(1) 泌阳断陷湖盆下第三系核三上段所包括三个跨时分别为 1.08, 1.40, 1.02 Ma 的陆相层序,在双河-赵凹地区表现为冲积扇-扇三角洲-湖相沉积体系配置。

(2) 在泌阳断陷双河-赵凹地区下第三系核三上段的三个陆相层序中,发育 13 个小层序组,其中可识别的小层序达 50 多个,其内部沉积微相达 10

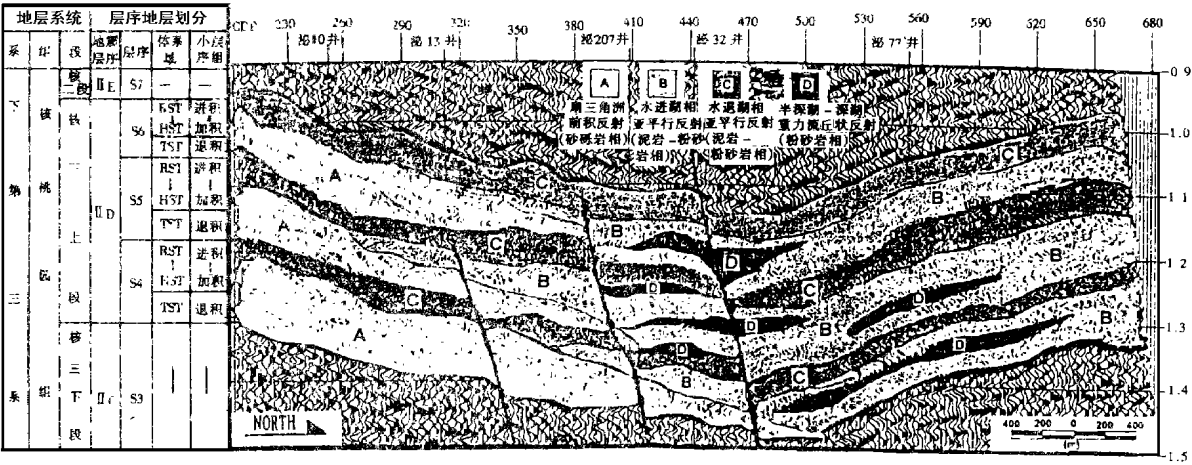


图 5 泌阳断陷双河-赵凹地区核三上段 IN-LINE130 三维地震剖面层序地层解释图

Fig.5 Sequence stratigraphic interpretation of IN-LINE 130 3D seismic profile of the upper member of Eh3 in Shuanghe-Zhao'ao area, Beyang fault-depression

余种。据此,可采用 Fischer 图解法,求取可容空间变化速率曲线。

(3) 分别在高匀速、中等匀速和低匀速物源供给条件下,根据研究区核三上段 Fischer 图解曲线,采用计算机定量模拟了研究区下第三系核三上段沉积时期,可容空间变化过程与陆相层序响应特征。这一模拟结果显示:在中等匀速物源供给情况下,易形成补偿性沉积作用,早期呈退积型式,中期为垂向加积型式,晚期为进积型式;在高匀速物源供给条件下,极易形成过补偿性沉积作用,层序单元的各个体系域都表现为进积-垂向加积型特征;在低匀速物源供给条件下,则极易形成欠补偿性沉

积作用,层序单元的各个体系域都表现为退积-垂向加积型特征。

(4) 泌阳断陷湖盆双河-赵凹地区下第三系核三上段的三个陆相层序,为高匀速物源供给条件下形成的,其中 S4 层序的水进体系域,应列为该区油气勘探的重要目标层段。

参 考 文 献

1 Vail P R, Audemard F, Bowman S A, et al. The stratigraphic signatures of tectonics, ecstacy- an sedimentology and overview. In: Einsele G, Mitchum R N, eds. Cycles and events in stratigraphy. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 617~ 659

2 Miall A D. Stratigraphic sequences and their chronostratigraphic correla-

tion. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61: 497~ 505

3 解习农, 程守田, 陆永潮. 陆相盆地幕式构造旋回与层序构成. *地球科学*, 1996, 21(1): 27~ 33

4 胡受权. 试论构造因素对泌阳断陷陆相层序形成的影响机制. *大地构造与成矿学*, 1997, 21(4): 315~ 322

5 胡受权. 泌阳断陷双河-赵凹地区下第三系核三上段陆相层序发育的可容空间机制. *沉积学报*, 1998, 16(3): 102~ 108

6 胡受权. 层序地层学在泌阳断陷湖盆中的应用. *石油地球物理勘探*, 1998, 33(4): 541~ 552

7 胡受权, 颜其彬. 泌阳断陷双河-赵凹地区陆相层序地层学模式. *地质科学*, 1998, 33(4): 435~ 446

8 Hardy W J, Waltham D A. Computer modeling of tectonics, eustasy and sedimentation using the machintosh. *Geobyte*, 1992, 7(6): 128~ 132

9 Lawrence D T. Stratigraphic simulation of sedimentary basin: concepts and calibration. *AAPG Bull*, 1990, 74(3): 544~ 568

10 Sadler P M, Osleger D A, Montanez L P. On the labeling, length and objective basis of Fischer plots. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(2): 360~ 368

11 Posamentier H W, Weimer P. Siliclastic sequence stratigraphy and petroleum geology- where to from here? *AAPG Bull*, 1993, 77(5): 731~ 742

12 池英柳, 张万选, 张厚福, 等. 陆相断陷盆地层序成因初探. *石油学报*, 1996, 17(3): 19~ 25

8 Hardy W J, Waltham D A. Computer modeling of tectonics, eustasy and

FISCHER DIAGRAM AND ITS COMPUTER SIMULATION
OF SEDIMENTARY RESPONSE

—A CASE STUDY ON THE UPPER MEMBER OF Eh₃ IN BIYANG FAULT-DEPRESSION

Hu Shouquan Chen Guoneng
(*Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou*)

Wang Yingmin Tong Chongguang
(*Department of Petroleum, Chengdu College of Technology, Chengdu, Sichuan*)

Abstract

The upper member of Eh₃ in Biyang fault-depression includes 3 terrigenous sequences with the span ages of 1. 08 Ma, 1. 40 Ma and 1. 02 Ma respectively. A depositional system of fluvial fan-delta-lacustrine facies was developed in Shuanghe-Zhao'ao region of the depression. The 3 terrigenous sequences consist of 13 parasequence sets, more than 50 recognizable parasequences and 10 microfacies. The accommodation change curves of the terrigenous sequences were obtained by using Fischer diagram. The accommodation variation process and the terrigenous sequence response characters of the upper member of Eh₃ in Shuanghe-Zhao'ao area during deposition were simulated by the application of quantitative sequence stratigraphic simulation system. The results indicate that the terrigenous sequences of the study area formed under the condition of high and uniform velocity of material source supply, and that S4 sequence of TST should be taken as important target for hydrocarbon exploration.

Key Words: Fischer diagram terrigenous sequence process-response simulation Biyang fault-depression