

陆相盆地露头储层地质建模研究与概念体系^①

焦养泉 李思田

(中国地质大学, 武汉 430074)

露头储层地质建模的关键是阐明储层非均质性特征(即储层沉积非均质性、储层成岩非均质性和储层物性非均质性特征)。储层非均质性具有层次性,并可以分为3种尺度(大尺度、中尺度和小尺度)进行研究。

在不同尺度的沉积非均质性研究基础上,建立储层内部构成格架模型是储层沉积非均质性研究所要解决的主要问题,因此补充和完善砂体内部构成单位和等级界面分析法的概念等级序列尤为重要。本文提出河道单元在各类河道中具有普遍存在的规律,并指出不同类型河道砂体的内部构成复杂性和层次性具有差异,认为形成这种差异的主原因在于古流能量存在差异和沉积作用方式的不同。

建立高渗透网络格架模型的基础是识别和划分流体流动单元。流体流动单元是以隔挡层为边界按水动力条件划分的建造块,其规模和分布空间与砂体内部构成单位关系密切。

不同尺度的储层物性非均质性具有不同的研究对象和重点。以中尺度研究为例,储层物性非均质性的焦点在于流体流动单元的差别上以及构成流体流动单元的储层岩性相的差别上。

沉积作用对储层物性的影响无疑是重要的,但如果叠加有不均匀的成岩作用的影响,那么整体孔渗值将会大大地降低。

关键词 内部构成单位 隔挡层 流体流动单元 非均质性 储层地质建模

第一作者简介 焦养泉 男 35岁 副教授 沉积盆地分析

中国东部的老油田目前普遍面临着高含水和产量递减的严峻形势,为了稳定产量必须深入挖掘剩余油。多年的生产实践证明储层的内部结构(即非均质性)是影响挖掘潜力的关键因素(裘亦楠,1990)。地下储层结构特征可以根据现代或古代的露头研究加以完善,露头能提供高精度的便于总结储层非均质性的各种信息,它是解决储层地质和油田开发面临的诸多难题的重要途径,因此,以露头为特色的储层地质建模研究已引起人们的高度重视。

1 储层地质建模的研究内容

精细露头储层研究的核心在于建立定量的储层地质模型,其研究内容可分为4部分:即储层沉积非均质性、储层成岩非均质性、储层物性非均质性和建立储层的地质模型。储层沉积非均质性研究所要解决的主要问题是建立储层的内部构成格架模型,这需要借助沉积体系分析法(Fisher and McGowen, 1967; 李思田等,1996)、内部构成单位和等级界面分析法(Miall, 1985, 1993)而得以完成。

储层成岩非均质性主要揭示成岩作用的不均匀发育与分布特征。

储层物性非均质性是沉积非均质性和成岩非均质性综合影响的结果,识别各级沉积界面上的隔挡层(isolate barrier beds)(焦养泉、李祯,1995),并以隔挡层为边界划分流体流动单元(fluid flow units),阐明流体流动单元内部孔渗分布规律,建立高渗透网络格架模型是其研究重点。

储层地质模型是在上述3方面研究基础上探讨储层物性与沉积作用、成岩作用之间的相关性,对储层物性变化规律进行动力成因学解释,总结储层砂体内部结构与空间展布等规律,以便概括出能反映储层非均质性基本面貌的概念模型。构造运动所产生的非均质性不在考虑之列。

2 构成单位等级序列完善——建立砂体内部构成格架模型的基础

2.1 构成单位等级序列

构成单位(architectural units)是一个由其形态、相组成及其规模所表征的沉积体(Miall, 1985),它是沉积体系内部一种特定沉积作用过程的产物,并由各级内部界面彼此自然地分开。对不同级别构

^① 本文得到中国石油天然气总公司“七五”和“八五”重点攻关项目和新疆石油管理局立项项目资助

成单位和沉积界面的识别与研究,使划分构成单位的分级系统成为可能。正如 Tyier (1988) 用巨型尺度、大尺度、中尺度和微尺度对曲流河砂体所进行的分级解剖一样, Miall 将碎屑沉积物划分为 8 级构成单位, 并明确指出了最大级别的构成单位是盆地充填复合体, 而最小级别的构成单位是波痕。近年来,

通过对鄂尔多斯盆地和准噶尔盆中生代的几种沉积体系和典型河道砂体的精细解剖发现砂体内部构成单位研究实际上可以和层序地层分析、沉积体系分析融为一体而构成一个完整序列(表 1)。然而在进行储层建模研究中应将主要精力集中于第 6~14 级(图 1)。

表 1 陆相盆地沉积充填内部构成序列

构成单位等级	界面等级	尺度规模
1. 盆地充填序列	盆地基底与盖层之边界面	
2. 构造层序	大区域不整合面	
3. 层序	区域不整合面及可与之对比的整合面	
4. 小层序组——体系域	主要湖泊扩张边界及可与之对比边界面	
5. 小层序——体系域单元	湖泊扩张边界及可与之对比边界面	
6. 沉积体系单元	Miall 的第 6 级边界面	大尺度
7. 成因相	Miall 的第 5 级边界面	
8. 成因相内部构成单位	Miall 的第 5 级边界面	

以曲流河道砂体为例, 如果要进行精细储层研究, 则此系统仍可继续划分

9. 河道单元	Miall 的第 5 级边界面	
10. 点坝 (大底形)	Miall 的第 4 级边界面	中尺度
11. 点坝增生单元 (大底形生长增量)	Miall 的第 3 级边界面	
12. 交错层系组 (中底形)——储层岩性相区	Miall 的第 2 级边界面	
13. 交错层系 (微底)——储层岩性相	Miall 的第 1 级边界面	
14. 纹层、显微纹层		微尺度

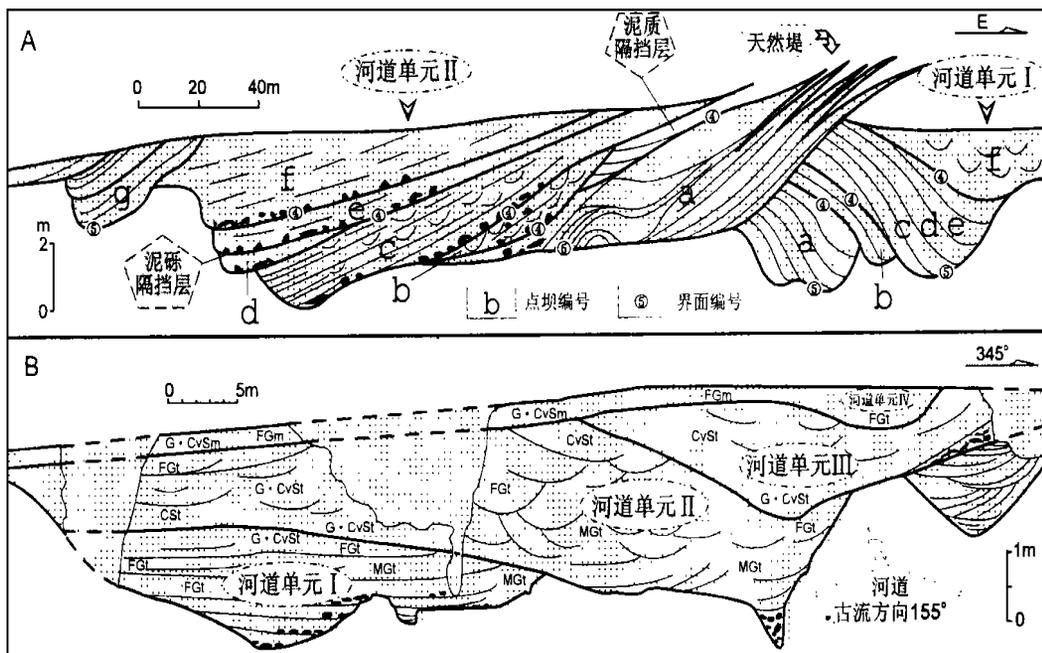


图 1 典型河道砂体内部构成写实图

A: 曲流河道砂体, T_{2e}, 鄂尔多斯盆地; B: 扇前湿地中的低弯度河道砂体, T_{3k}, 准噶尔盆地

MGt 为具槽状交错层理的中砾岩; FGm 为具块状构造的细砾岩; FGt 为具槽状交错层理的细砾岩; G·CvSm 为具块状构造的含砾极粗砂岩; G·CvSt 为具槽状交错层理的含砾极粗砂岩; CvSt 为具槽状交错层理的极粗砂岩; CsT 为具槽状交错层理的粗砂岩

2.2 砂体内部构成单位等级序列的完善与讨论

(1) 大尺度沉积非均质性的研究对象是沉积体系(焦养泉等, 1995)。首先, 在沉积体系内部, 成因相(沉积体系的基本构成单位)具有各自独特的几何形

态、内部结构和岩性相等特征, 这是构成大尺度沉积非均质性的根本所在。体系中的骨架砂体通常是油气的主要储层; 其次, 不同类型沉积体系中的骨架砂体差别很大, 尤其是在几何形态等方面(图1、表2)。

表2 鄂尔多斯盆地中生代河道砂体形态参数统计表

沉积体系类型	复合河道			点坝或河道单元			砂体横向 出现频率	砂体垂向 出现频率			
	宽度(m)	厚度(m)	宽/厚	宽度(m)	厚度(m)	宽/厚					
曲流河体系	CH	No. 1	400	5	80	1	204	2.8	73	1	
								116	1.8	64	1
		No. 2	520	11.2	46	1					
		No. 3	170	4	42	1			1/700m ±	1/10m ±	
		No. 4	325	7.5	43	1	225	3.5	64	1	
		No. 5	380	5	76	1	260	5	52	1	
		No. 6	250	6	42	1	150	2.5	60	1	
							170	15	11.3	1	
		No. 1	440	26	17	1	200	20	10	1	
							230	26	8.8	1	
湖泊三角洲体系	DC	No. 2	100	6	16.6	1			1/300m ±	1/70m ±	
		No. 3	230	15	15	1	154	7.5	21	1	
		No. 4	120	4.5	26	1					
		No. 5	75	2	37	1					
		No. 1	> 1500	12	> 125	1					
辫状河体系	BCH	No. 2	1100	9	120	1					
		No. 3	> 800	15	> 50	1					

注 CH: 曲流河道砂体; DC: 分流河道砂体;
BCH: 辫状河道砂体。

(2) 在成因相内部(典型骨架砂体)进行各级构成单位的识别和划分最为重要, 它是建立砂体内部构成格架模型的基础, 这相当于中尺度的沉积非均质性研究(焦养泉等, 1993)。

河道单元在各种类型的河道砂体中是普遍存在的(图1, 表1), 它具有独立的三维几何形态, 与周围沉积体边界清楚(被第5级界面所限定), 是一次相对连续的河道强化事件的完整记录, 即包含了单个河道的发生、发展、衰退和消亡的全过程(李思田、焦养泉、付清平等, 1993)。由于河道单元间的冲刷面所代表的时间和沉积过程是不连续的, 因而它成为复合河道砂体内部的基本构成单位(焦养泉、卢宗盛, 1996)。

不同类型河道砂体的内部构成复杂性和层次性具有差异, 即由河流砂体到三角洲砂体的内部构成

非均质性总体具有由复杂到简单的渐变过程(表3)。主要原因在于: ① 古流能量和古水流变化周期有差别。河流沉积体系形成时的古水流能量较高, 且古水流变化周期性强, 这为形成复杂的河道内部结构提供了条件。相比而言, 水下分流河道砂体的古水流能量较弱, 因而砂体内部结构相对简单。古流能量的差别可以从砂体的发育规模、沉积构造类型和沉积物粒度等方面得以印证; ② 沉积作用方式有差别。如曲流河的侧向加积作用有利于第3级及第4级界面的发育(图1A), 而以下切作用为主的分流河道砂体中普遍缺乏第4级界面。

2.3 微尺度沉积非均质性研究

借助显微镜、图像分析等手段, 研究砂体内部纹层、显微纹层特征, 以及粒度、分选性、填隙物含量和古流能量等的分布规律(图2A)。

表 3 准噶尔和鄂尔多斯盆地中的河道型砂体内部构成等级序列比较

界面等级	扇前湿地中的 低弯度河道砂体	曲流河道砂体	分流河道砂体	水下分流河道砂体
1		交错层系(微底形) —— 储层岩性相		(很小, 划分无意义)
2		交错层系组(中底形) —— 储层岩性相区		
3	顺流加积体	点坝增生单元		很少发育
4	及其增生单元	点坝(大底形)		
5		河道单元		
6		河道复合体		

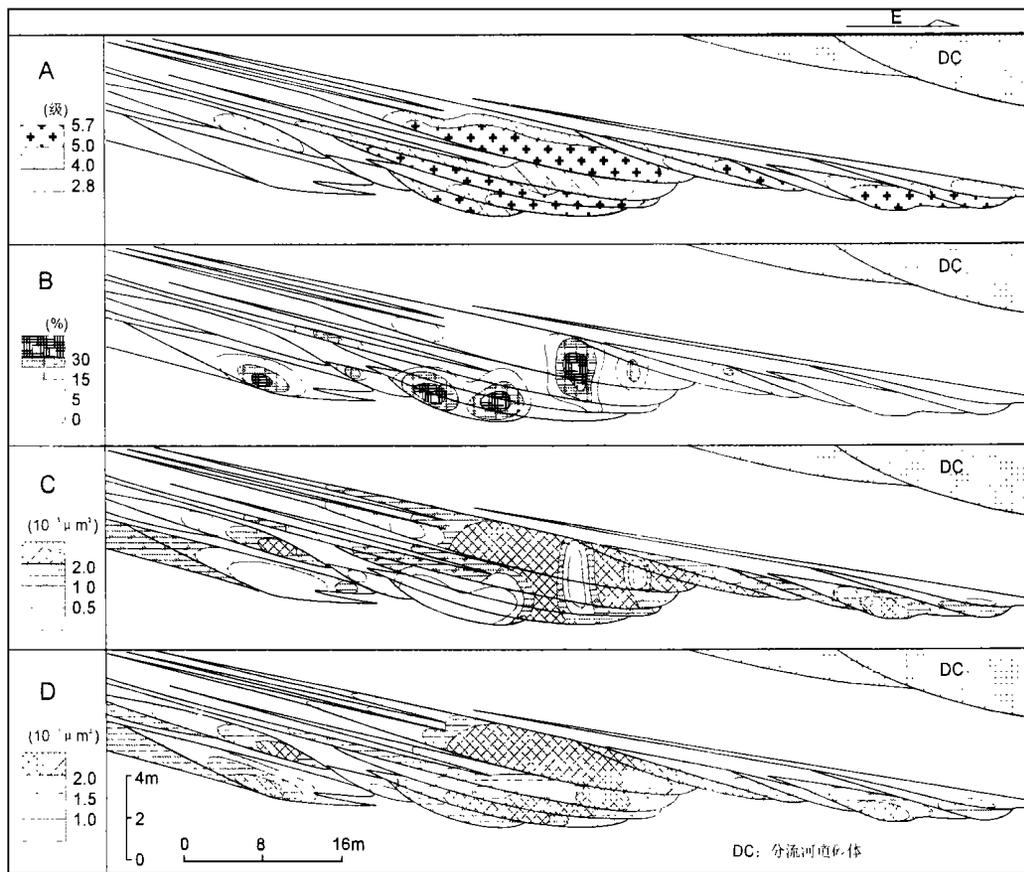


图 2 鄂尔多斯盆地延安组水下分流河道砂体几种参数分布图

A 为古水流强度等级; B 为碳酸岩含量; C 为水平渗透率; D 为去除碳酸岩校正后的水平渗透率

3 隔挡层、流体流动单元与构成单位——建立高渗透网络格架模型的基础

由于河道砂体在沉积过程中能量与强度的差异以及随后成岩作用的影响便产生了大量的低渗透隔挡层。隔挡层按其物质成分可以划分为细粒物质隔

挡层、泥砾隔挡层、植物碎屑隔挡层和成岩隔挡层等 4 种类型。其渗透率通常是正常河道砂体的几十甚至几千分之一(表 4)。这 4 类隔挡层的成因和分布各异都与内部构成单位的边界面关系密切(焦养泉、李祯, 1995)(图 3)。

流体流动单元系指在复合砂体内部按水动力条件划分的建造块(building blocks), 它以隔挡层为边界。流体流动单元是高渗透网络的基本构成单元, 它是进行储层物性分析、剖析高渗透网络的最佳编图

单位(图4)。流体流动单元的规模和分布空间与砂体内部构成单位关系密切,它和构成单位属于类似的概念,只是形态、规模和划分标准不同而已。构成两者最基本的物质单位是相同的,即储层岩性相,这对于在流体流动单元中阐明储层物性非均质性和高渗透网络的成因动力学是极为有用的。

由复合河道砂体内部多个流体流动单元组成的集合体称之为流体流动单元组。一个沉积体系可以包含多个相互孤立或半流通的流体流动单元组的空间组合,由此可以构成更高级别的高渗透网络(表

5)。

表4 曲流河道砂体中几种隔挡层的代表孔渗值

类型	水平渗透率($10^3 \mu\text{m}^2$)		垂直渗透率 ($10^3 \mu\text{m}^3$)	孔隙度 (%)
	平行古流	垂直古流		
泥砾隔挡层	5.613	4.661	3.789	17.3
泥质隔挡层	0.129	0.053	0.016	11.6
植物碎屑隔挡层	0.60		0.13	13.8
成岩隔挡层	0.438	0.013	0.01	9.3
正常砂岩	62.149	42.737	24.754	21.1

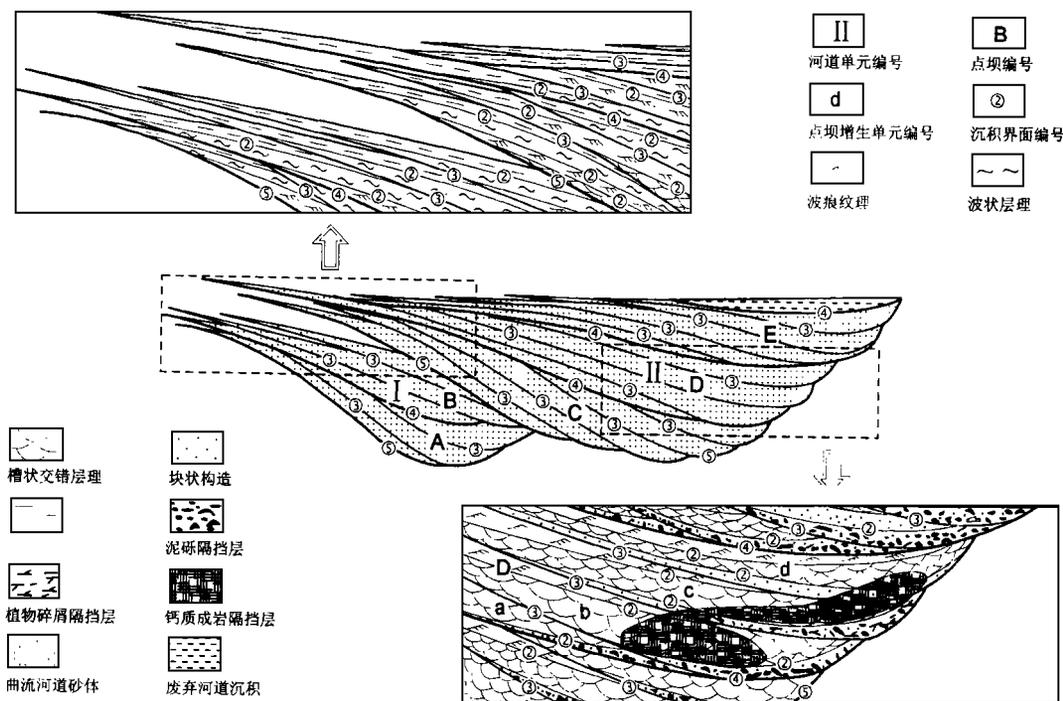


图3 曲流河道砂体内部构成及隔挡层分布模式图(据焦养泉等,1995修改)

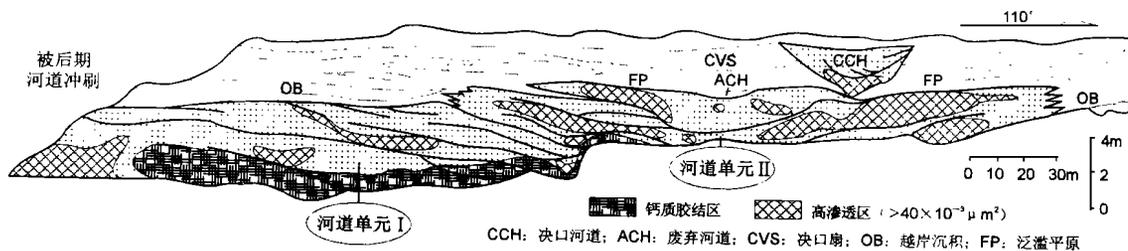


图4 鄂尔多斯盆地延安组曲流河道砂体中隔挡层及流体流动单元空间分布图

表5 储层物性非均质性分级与研究重点

尺度	研究重点	研究重点
微尺度	1 岩心级多孔介质研究——孔隙类型、孔隙结构、各向异性特征	高渗透网络基本单元研究
中尺度	2 砂体内部流体流动单元划分及储层物性非均质性变化规律	建立中尺度高渗透网络格架模型
	3 砂体内部各流体流动单元空间配置形式,及其整体物性比较	
大尺度	4 同一体系中,不同成因相比较,识别流体流动单元组	建立大尺度高渗透网络格架模型
	5 同类体系中,流体流动单元组空间配置,以及整体物性比较	
	6 不同类型体系中,流体流动单元组比较	

由此可见,在内部构成研究基础上正确识别阻挡层,并据此划分流体流动单元和流体流动单元组是深入探讨储层物性非均质,总结规律性,并进而进行储层模拟的基础。

4 建立高渗透网络格架模型——储层物性非均质性研究

储层物性非均质性与内部构成单位一样也具有层次性,可以分 3 种尺度进行研究(表 5),注重储层物性非均质性的层次结构研究有助于阐明储层的复杂结构和规律性。

(1) 在沉积体系级的大尺度范围内,同一沉积体系中,不同的成因相孔渗值差别极大,在曲流河沉积体系和湖泊三角洲沉积体系中均如此(图 5)。这主要取决于沉积作用过程和环境的不同(焦养泉等,1994);另外,在同一体系中由于骨架砂体分布以及形成时的古流能量有差别,导致了流体流动单元组在空间上分布的不均一性和整体孔渗值的差异;不同的沉积体系具有不同的储集性能,通过统计发现,曲流河沉积体系中骨架砂体的整体物性相对较好,湖泊三角洲砂体相对较差。

(2) 在成因相级的中尺度(即通常所指的单河道砂体规模)范围内,储层物性非均质性的焦点在于流体流动单元和构成流体流动单元的储层岩性相的差别上。

在砂体中,各流体流动单元的物性分布具有相似性。即高孔渗区通常位于流体流动单元中部和下部,向上及两侧逐渐降低,最差的部分位于流体流动单元的顶部和两侧翼部(焦养泉等,1994)。究其原因,主要在于构成流体流动单元的基本构成单位——储层岩性相类型、空间分布和发育规模存在差别(图 6),从而使流体流动单元具有自相似性和多旋回韵律性(图 2C)。

各流体流动单元之间孔渗值存在整体差异。其原因主要在于相对高孔渗的储层岩性相的发育规模,它越发育,孔渗整体值就愈高,反之则相反(图 6)。

(3) 在岩心级的微尺度范围内,多孔介质具各向异性特征。即平行古水流的水平渗透率(K_{H2})最大,垂直层面的垂向渗透率(K_V)最低,垂直古水流的水平渗透率(K_{H1})中等,即具有 $K_{H2} > K_{H1} > K_V$ 的规律(图 7)。孔隙类型和孔隙结构特征是形成多孔

介质各向异性物征的关键因素。各向异性模式在进行储层模拟时对于描述多孔介质的性质具有重要意义。

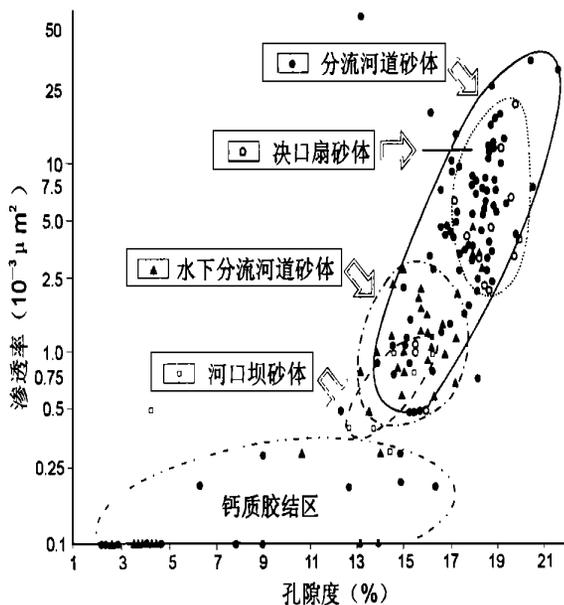


图 5 鄂尔多斯盆地延安组湖泊三角洲体系主要砂体孔渗值比较

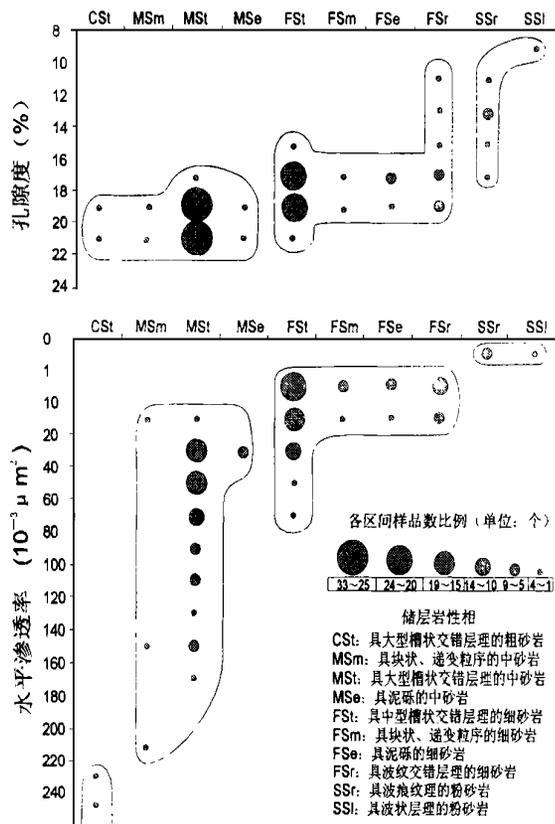


图 6 鄂尔多斯盆地延安组曲流河道砂体中各储层岩性相孔渗值分布区间图

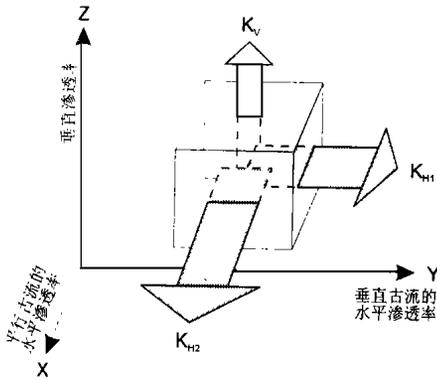


图7 河道储层砂体中各采样点
微尺度各向异性模式图

5 成岩非均质性研究

如果在沉积非均质基础上, 叠加有不均匀的成岩作用的影响, 那么整体孔隙率将会大大地降低(图2B、2C)。与其它成岩作用比较, 钙质胶结作用通常具有明显的非均质性, 它在重力作用和流体作用下沿沉积界面以及原始高孔渗区分布(图2B)。如图2A、2D所示, 去除成岩非均质性影响后发现, 储层物性分布与沉积作用关系密切, 这说明沉积作用对储层物性的影响是第一位控制因素, 而成岩作用处于第二位(焦养泉等, 1994)。

作者感谢裘亦楠总工、杨瑞麒总工等人对此项研究所给予的| 惯支持和精心指导。

参 考 文 献

1 裘亦楠. 储层沉积学研究工作流程. 石油勘探与开发, 1990, 17

(1): 85 ~ 90

- 2 Fisher W L, McGowen J H. Depositional systems in the Wilcox Group of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas. *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.*, 1967, 17: 105 ~ 125
- 3 李思田. 沉积体系分析的进展和层序地层学. 见: 李思田主编, 含能源盆地沉积体系——中国内陆和近海主要沉积体系类型的典型分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1 ~ 11
- 4 Miall A D. Architectural elements analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Science Reviews*, 1985, 22(4): 261 ~ 308
- 5 Miall A D. Hierarchies of architectural units in terrigenous clastic rocks: a framework for the analysis of fluvial deposits. 29th IGC Abstracts, Volume 2 of 3, - 2- 2, 0- 10, 1993: 293
- 6 焦养泉, 李祯. 河道储层砂体中隔挡层的成因与分布规律. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 78 ~ 81
- 7 焦养泉, 李思田, 李祯等著. 曲流河与湖泊三角洲沉积体系及典型骨架砂体内部构成分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995: 3 ~ 22
- 8 焦养泉, 李思田, 杨士恭等. 湖泊三角洲前缘砂体内部构成及不均一性露头研究. 地球科学, 1993, 18(4): 441 ~ 451
- 9 李思田, 焦养泉, 付清平. 鄂尔多斯盆地延安组三角洲砂体内部构成及非均质性研究. 见: 裘亦楠等主编: 中国油气储层研究论文集(续一). 北京: 石油工业出版社, 1993: 312 ~ 325
- 10 焦养泉, 卢宗盛. 曲流河沉积体系内部构成和层次结构的典型分析——以鄂尔多斯盆地南缘柳林镇二马营组为例. 见: 李思田主编, 含能源盆地沉积体系——中国内陆和近海主要沉积体系类型的典型分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 46 ~ 57
- 11 焦养泉, 李思田等. 湖泊三角洲水下分流河道砂体储集性及储层地质模型研究. 地质探索, 1994, 10: 33 ~ 41

(收稿日期: 1997年10月15日)

GEOLOGIC MODELING FOR OUTCROP RESERVOIR OF CONTINENTAL BASIN AND THE CONCEPTUAL SYSTEMS

Jiao Yangquan Li Sitian

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract

The geologic modeling for outcrop reservoirs depends on the clarification of the characteristic heterogeneity of reservoirs, including the depositional heterogeneity, diagenetic heterogeneity, and the heterogeneity of porosity and permeability. The heterogeneity of reservoirs can be studied on three scales (macroscopic scale, mesoscopic scale and microscopic scale).

From the study of depositional heterogeneity on different scales, the essential procedure is to model the internal architectural frame, for which it is significant to complement and improve the conceptual order for the internal architectural units and bounding surfaces. This paper indicates the common channel units in various channels, explains the differences of the internal architectural complexity and beddings for different channel sand bodies, and takes the different palaeocurrent energy and depositional modes as the major causes for the differences.

Modeling the strong permeation net frame is based on recognition and differentiation of fluid-flow units which are building blocks differentiated with isolate barrier beds as the bounding hydrodynamic conditions and are closely related with the internal architectural units of sand bodies in scales and spatial distribution.

The study on the heterogeneity of reservoir porosity and permeability of different scales depends on different subjects, for instance, the study for mesoscopic scale is focused on the differences between fluid-flow units and the differences between the reservoir lithological facies which formed the architectural units.

Deposition significantly dominates the porosity and permeability of reservoirs, but in case of heterogeneous diagenesis in superposition, the integral porosity and permeability will greatly decrease.