

辫状河砂体储层沉积学研究

——以张家口地区露头砂体为例

伍涛¹ 王建国² 王德发¹

1(中国地质大学 北京 100083) 2(大庆石油学院秦皇岛分院 河北秦皇岛 066000)

提要 本文从储层沉积学的角度,对张家口地区辫状河砂体的成因进行了分析,划分了3级层次界面和6种岩石相类型,对沉积作用和成岩作用与储层物性的关系进行了探讨。指出沉积作用是影响砂体物性的主要因素,成岩作用对物性的改造受沉积作用控制。粒度中值和泥质含量与储层物性密切相关,胶结物对孔隙度的影响大于对渗透率的影响。研究表明,砂岩相与储层物性能建立起很好的对应关系,代表高能环境的砂岩相总是对应相对较好的储层物性;界面对储层的影响表现在:1级界面控制了砂体的几何形态和规模,2级界面控制了单砂体的宏观非均质性,3级界面控制了高孔、渗区的分布。最后建立了辫状河砂体的一维和二维储层地质模型,这将对油田的开发设计起指导作用。

关键词 辫状河 储层沉积学 层次界面 岩石相 储层地质模型

第一作者简介 伍涛 男 27岁 硕士 储层地质研究

1 前言

目前,我国对河流—三角洲砂体研究较为详细,而对辫状河砂体的认识较差,辫状河受季节性洪水控制显著,河道迁移快,非均质程度高,建模难度大。当前,野外露头研究正日益受到重视。由于钻井取芯的不连续性,控制井井间有一定距离而难以揭示砂体形态及内部相变;地震方法离有效解释物性和定量评价单砂体的二维展布还相差甚远,这样依靠地下信息建立储层地质模型存在难以克服的困难。而野外露头的可见性、直接性和可测性为建立精确储层模型提供了一条新途径。

本文以张家口地区的辫状河露头砂体为例,在大比例尺实测和密集取样的基础上,对岩石的沉积、成岩、物性及非均质性做了详细分析,建立了一维和二维储层地质模型,为油田对比及预测服务。所研究的露头属侏罗系阎家窑组,长430 m,厚度3.4~6.7 m,砂体呈顶平底突的透镜状,延伸远,连通性好,底部地形起伏明显,取名脑包山砂体。

2 砂体成因及界面层次分析

据 Miall^[1]综合已发表的一些现代辫状河资料,

把辫状河沉积分为六类,从沉积特征和垂向序列上看脑包山辫状河砂体与南萨斯喀彻温型(S. SASKATCHEWAN)有一定的可比性(图1),砂体单层厚度小,以复合坝及小河道为特征。脑包山砂体在垂向上显示出两个向上变细的旋回,以冲刷面为界线。底部冲刷面为河流作用的起始面,延伸稳定,切割下伏冲积平原的泛滥沉积。冲刷面上泥砾发育,含大量砾石,向上为板状交错层理、平行层理,构成一个向上变细的正旋回。上部冲刷界面代表又一次较强的洪泛作用,砂粒粗,含砾石,以多个河道叠加沉积为主,河道顶部发育一层细粉砂岩组成的水平层理,为河流的漫流沉积,代表河流作用的结束,构成第二个向上变细的正旋回。总的看来,下部旋回以横向坝迁移为主,上部旋回以河道叠加为主。

为进一步对脑包山辫状河砂体进行内部构成的研究,本文借鉴了 Miall^[2]河流砂体界面层次的划分方法,对脑包山辫状河砂体内部构成进行逐层次的划分和研究,以求正确建立起砂体内部构成的层次格架和进行非均质性的研究。为便于描述,将 Miall从宏观到微观由大到小改为由小到大的顺序,即将最大一级界面定为1级界面。通过实际观察和沉积断面写实,在脑包山辫状河砂体中划分出三级界面

(图2)。

南萨斯喀彻温型
(据 Miall A. D., 略有修改)

脑包山辫状河

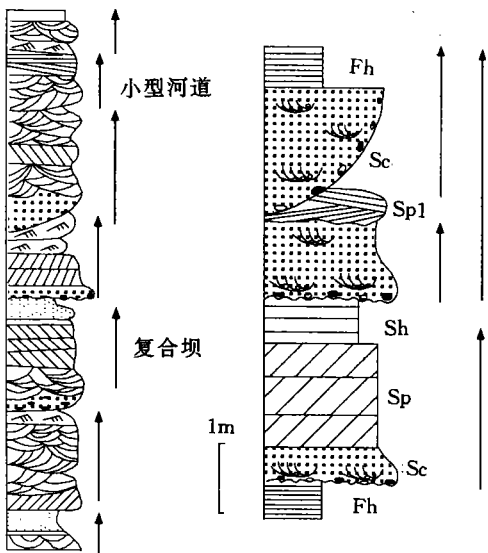


图1 辫状河沉积的垂向层序

Fh. 水平层理粉砂岩相; Sc. 冲刷充填层理砂岩相

Sp. 板状交错层理砂岩相

Spl. 低角度板状交错层理砂岩相; Sh. 平行层理砂岩相

Fig. 1 Vertical sequences of braided river deposits

2.1 1级界面

即河道的侵蚀面, 该界面代表高能条件的一次河流强烈冲刷侵蚀作用, 是河流作用的开始, 相当于

所研究砂体的底部冲刷面, 界面起伏不平, 含大量泥砾, 是控制河道砂体几何形态和规模的重要界面。

2.2 2级界面

即各次洪泛作用的起始面。各次洪泛作用的水动力条件不同, 因而反映在粒级和层理特征上也不相同, 根据2级界面可将整个砂体划分为4段, 下段以板状交错层理为主, 其上发育平行层理, 再上以冲刷充填层理为特征, 顶部以水平层理粉砂岩为主, 为河流的漫流沉积, 代表河流作用的结束。

2.3 3级界面

为各小河道的冲刷界面, 亦为交错层系组界面, 即小—中型底形组成的界面, 界面上、下沉积构造和岩性不同, 这个界面也是用来划分储层岩石相的界面。

3 沉积作用对储层物性的影响

3.1 粒度和杂基含量对物性的影响

最能反映沉积时水动力强度的参数是粒度和杂基含量, 沉积时水动力强度越大, 则粒度越粗, 杂基含量越少, 反之则相反。从图3可看出, 粒度中值和泥质含量与孔隙度的相关性不明显, 其中泥质含量与孔隙度略显负相关, 可能是受成岩作用改造所致; 两者与渗透率均有较明显的相关性。这说明沉积时水动力强弱仍是影响储层非均质性的主要因素。

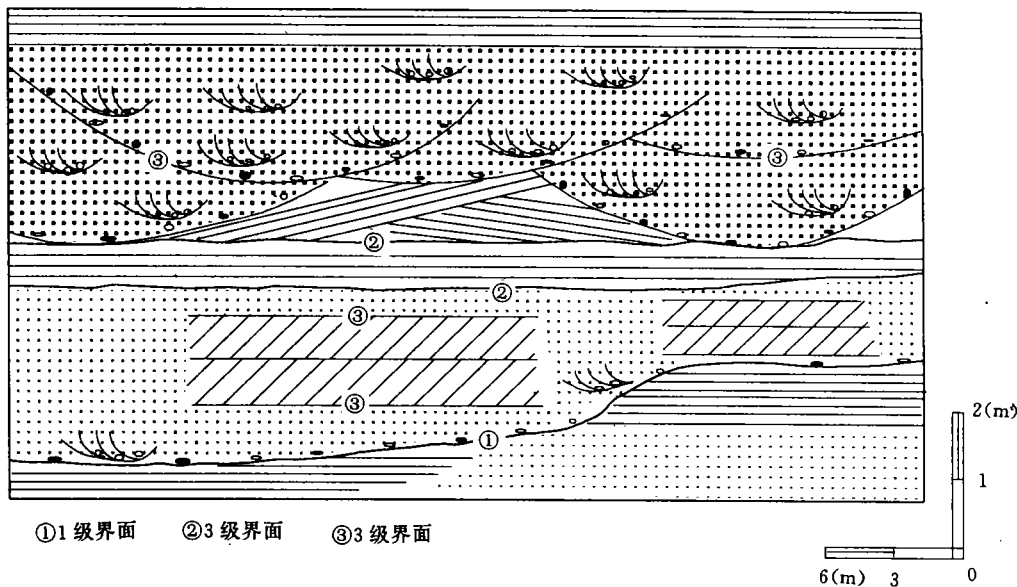


图2 脑包山砂体内部构成及层次界面(L1-L4 测线)

Fig. 2 Architecture and bounding surfaces of the Naobaoshan sandbody (Line1-Line4)

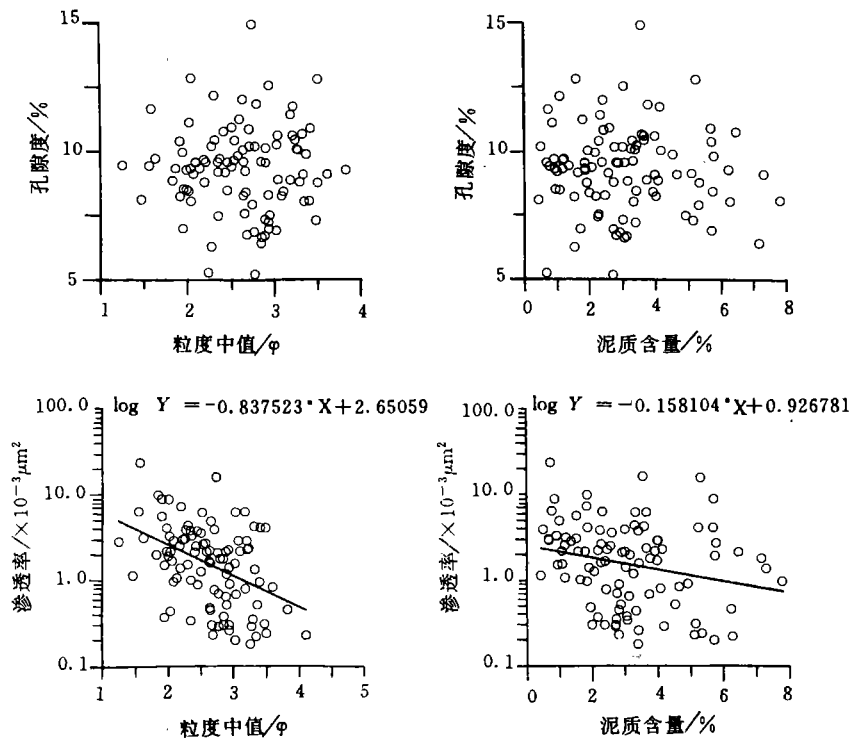


图 3 粒度中值、泥质含量与物性相关图

Fig. 3 Cross-plot of middle grain size and mud content versus porosity and permeability

3.2 岩石相与储层物性的关系

岩石相(Lithofacies)由 Miall^[1~2]首次引入研究河流沉积物,是以岩石结构特征为主来反映各微相砂体形成过程的古水动力条件,相当于“能量单元”。脑包山砂体缺乏砾岩相和泥岩相,以中粗砂、中细砂和粉砂为主,主要的砂岩相类型有:①水平层理粉砂岩相(Fh),以粉细砂岩为主,发育于砂体底部和顶部,厚度 0.2~0.8 m。泥质含量较高。为河流的漫流沉积。胶结物主要为钙质,局部可见钙质结核。②平行层理砂岩相(Sh),岩性以细砂岩、中细砂岩为主,厚度 0.3~1.0 m。③板状交错层理砂岩相(Sp)位于砂体中下部,岩性以中细砂岩为主,层系及层系组界面平直。④低角度板状交错层理砂岩相(Spl),交错层系角度小于 10°,层系厚度 2~3 cm,宽度 1~3 m。岩性为中细砂岩和细砂岩,分选较好,分布于底部及上部夹于各小河道之间,为滨岸砂坪沉积。⑤块状层理砂岩相(Sm),块状层理砂岩相多位于河道较深部位,为沉积物快速堆积产物,常见泻水构造和柔皱变形构造,缺乏明显的粒序和纹层,砾石夹杂其中,粒

径以中砂级和细砂级为主,为不等粒砂岩。⑥冲刷充填层理砂岩相(Sc),冲刷充填层理(Cut-filling)主要发育于砂体上部和下部冲刷界面附近粒度从粗砂至细砂都有,含大量砾石。各砂岩相的物性特征如表 1 所示。

表 1 各砂岩相的物性特征

Table 1 Reservoir properties of the sandstone lithofacies

砂岩相	孔隙度/%			渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均
水平层理粉砂岩相	2.63	11.55	7.79	0.08	2.28	0.52
块状层理砂岩相	5.91	10.81	7.93	0.26	3.30	1.02
低角度板状交错层理砂岩相	7.86	12.72	10.05	0.31	3.84	1.66
平行层理砂岩相	7.03	12.06	9.35	0.15	8.59	2.54
板状交错层理砂岩相	6.84	12.81	8.85	0.78	12.17	3.47
冲刷充填层理砂岩相	7.37	12.14	9.88	1.26	23.60	6.72

从表 1 可看出,砂岩相与储层物性有较好的相

关性,代表较高水动力条件的冲刷充填层理砂岩相、板状交错层理砂岩相和平行层理砂岩相具有较好的物性;而代表较低水动力条件的水平层理粉砂岩相和块状层理砂岩相则显示较差的物性。

4 成岩作用对储层物性的影响

4.1 压实作用

根据薄片观察,砂岩碎屑颗粒排列紧密,多为点线接触,可见颗粒的镶嵌接触和缝合接触,长石和石英的压裂和压碎现象较多,云母常见被压实弯折,泥岩岩屑和同生泥砾受压实后发生塑性变形,这说明压实作用强度较大,属中强至强烈压实,脑包山砂体的孔隙度介于2.63%~14.98%之间,平均为9.09%,压实作用是孔隙大量减少的主要原因。

4.2 胶结作用

砂岩多数为中等至弱胶结,胶结物主要是浊沸石、方解石,胶结方式以孔隙式胶结为主。浊沸石含量从2%~10%不等,个别达20%,平均为6%,方解石胶结物含量变化大,从不足1%到40%,且与粒

度有一定的相关性,在中下部细砂岩中方解石含量平均为5.3%,局部可形成钙质结核,在中上部中粗砂岩中平均含量为1.9%。

从图4可看出,胶结物含量对孔隙度的影响大于对渗透率的影响。原因主要是胶结物充填孔隙空间导致孔隙度、渗透率的显著降低,后期溶蚀作用产生的溶蚀孔、缝对渗透率的影响要远大于对孔隙度的影响,这样导致较高的胶结物含量也可显示较高的渗透率值。由于碳酸盐含量变化大(0%~40%),而76.8%的样品都集中在0%~30%这一狭窄范围内,因而与孔、渗的相关性较差,为了更好地表示碳酸盐含量与物性的关系,特把碳酸盐含量大于3%的点抽出来,再去除个别异常高值点,可以得到两者较好的相关性(图5),这说明只有当碳酸盐含量大于一定数值时,才对储层物性起显著的控制作用。

4.3 溶解作用

本区砂岩中溶解作用十分普遍,在显微镜下可见长石颗粒边缘因溶蚀而成锯齿状、港湾状以及长石中部被溶蚀形成粒内溶孔;浊沸石、长石等胶结物

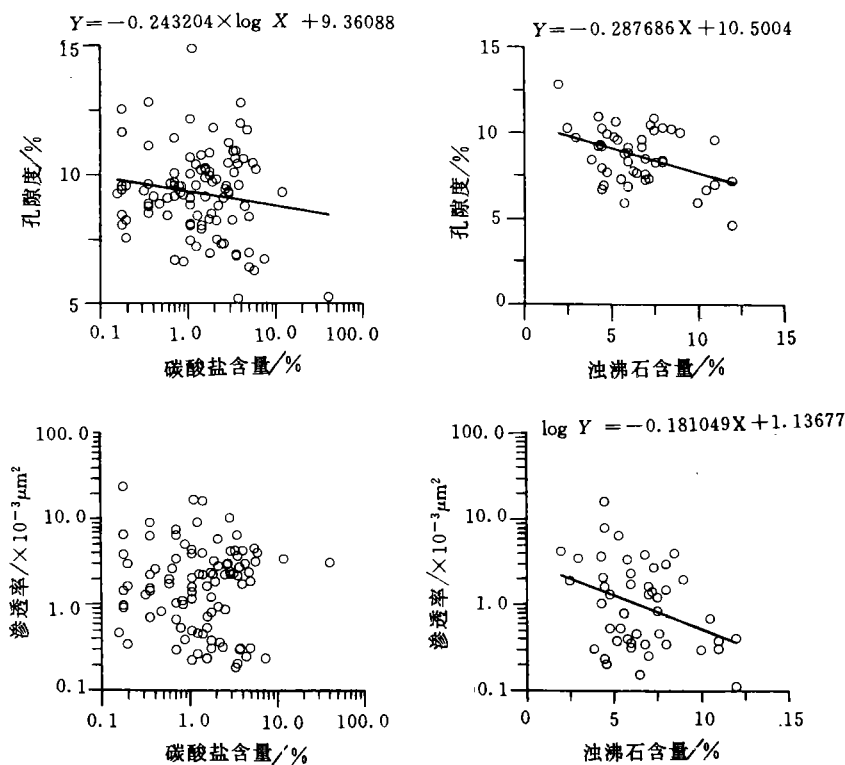


图4 碳酸盐、浊沸石含量与物性相关图

Fig. 4 Cross-plot of carbonate and lumontite contents versus porosity and permeability

的溶蚀现象也很普遍。总之,溶解作用形成的溶蚀孔 是本区的主要孔隙类型之一。

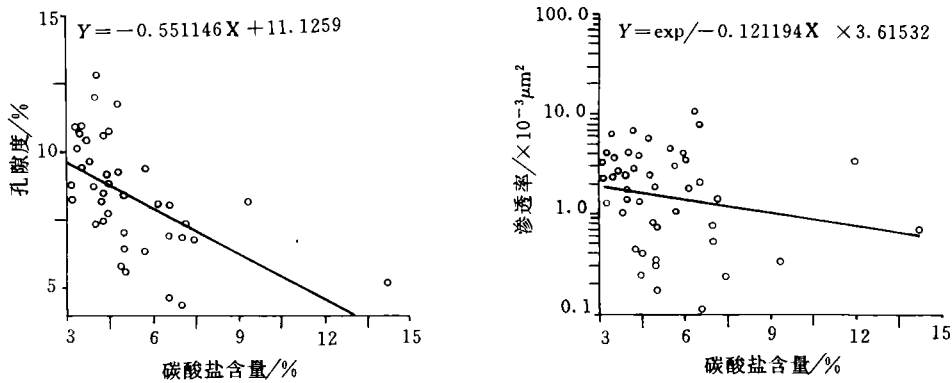


图 5 碳酸盐含量与物性相关图(Ca%>3%)

Fig. 5 Cross-plot of carbonate content versus porosity and permeability(Ca%>3%)

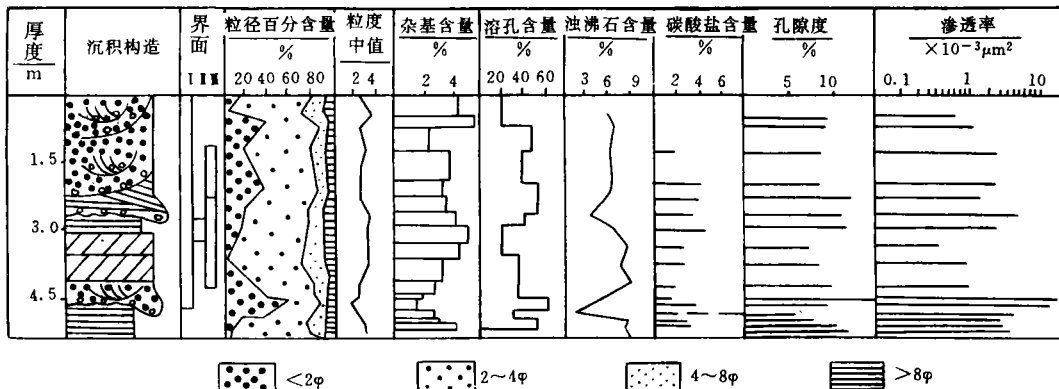
5 辫状河砂体储层地质模型

建立储层地质模型是储层沉积学研究的最高阶段^[3]。在目前技术条件下,单纯依靠储层沉积相分析,只能建立概念模型^[4]。概念模型(Conceptual model)是针对某一种沉积类型或成因类型的储层,把具代表性的储层特征(非均质性、连续性等)抽象

出来,加以典型化和概念化,建立一个对这类储层在区域内具普遍意义的储层地质模型。

5.1 一维储层地质模型

一维储层地质模型以测线为基础,综合纵向上升积序列、成岩演化、物性特征与非均质性,采用计算机模拟与作图。非均质性通过渗透率均值、级差、突进系数、变异系数来定量表示(图 6)。



粒度中值/φ	最小	最大	平均	杂基含量/%	最小	最大	平均
	1.87	3.83	2.98		0.69	6.24	3.55
渗透率 / * 10 ⁻³² μm ²	平均	最小	最大	级差	突进系数	变异系数	
	3.16	0.31	16.4	52.9	5.19	1.29	

图 6 辫状河砂体一维储层地质模型

Fig. 6 1-D reservoir model of braided river sandbodies

辫状河以河道宽浅为特征,侧向迁移迅速,以垂向加积为主^[6]。垂向上常常呈现“无规则”粒序,垂向上粒序的变化反映各次洪泛事件能量大小的波动及所携带碎屑物的粗细,粒度是影响物性的首要因素,即粒度愈粗,物性愈好。这是由于辫状河短距离搬运过程中,砂岩粒度的分异变化较之其他结构要素,如圆球度、分选等要剧烈得多,经过压实、胶结作用,粒度越细,所保留的孔隙越少,越粗则保留的孔隙越多,后期遭受溶蚀改造,孔隙水易在较粗颗粒间流动,因此溶蚀作用相对也要强烈,产生的溶孔和裂隙极大地改善了砂体物性。

从图6可看出,次生孔隙主要发育于上部和下部,与粒度有较好的对应关系,杂基含量总体上向上增加,浊沸石含量和碳酸盐含量有一定互补性,即两者互为消长,在底部冲刷面附近出现局部异常。孔隙度和渗透率在垂向上呈正韵律变化,与粒度变化规律一致,即在冲刷面附近出现高值,向上逐渐减少。渗透率变化较大,介于 $0.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 16.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均3.16,级差达52.9,突进系数5.19,变异系数1.29,说明储层非均质性严重。

5.2 二维储层地质模型

二维储层地质模型以层次界面、沉积模式、岩石相为根据,以横向上物性变化规律作为表示,通过计算机模拟及作图,建立了辫状河砂体的二维储层地质模型(图7)。

从图7可看出,相对较高孔、渗区多出现在砂体中上部,从河道中部向两侧呈雁列式展开,最高渗透率段并未出现在河道最深部位。前已述及,在砂体下部,主要发育横向坝,物性差别不大;而上部以河道沉积为主,河道侧向迁移频繁,造成许多小河道在侧向和纵向上相互叠加,多为透镜状砂体,以冲刷面相

分隔,冲刷充填层理发育,粒度较粗,代表较强的水动力条件,因而显示高的孔、渗值。河道中部以块状层理砂岩相为主,见泄水构造和柔皱变形构造,代表沉积速率较快的沉积,粗细粒度混杂,因而显示低的孔、渗值。

从图上还可看出,在1级和2级界面附近,往往出现较高的孔、渗值,这和冲刷面代表了高的水动力条件有关。砂体的层内非均质性也受2级界面的控制,根据2级界面可把砂体划分为4段,第一段即最下段发育横向坝,物性比较稳定,非均质性较小,突进系数和变异系数分别为6.48和1.14,第2段和第4段分别发育平行层理和水平层理,非均质性最小,变异系数分别为1.08和1.18,第3段以河道叠加为特点,颗粒较粗,但分选较差,因而既表现了高孔、渗值,又表现了很强的非均质性,突进系数和变异系数分别为11.15和1.6。3级界面对孔、渗的影响是存在的,因为孔、渗相对高的部位集中在3级界面发育处,至于3级界面是否起到了隔挡作用还不能肯定,因受取样条件限制未能对界面的渗透性进行分析,从野外观察来看,界面上常发育泥砾,有可能起隔挡作用。

碳酸盐对孔、渗的影响有一定范围,即在碳酸盐含量大于3%时才对孔、渗起较明显的降低作用,在小于3%的范围内可以忽略其影响。从碳酸盐含量大于3%的区域看,都对应较低的孔、渗值,甚至在有利的相带内也可出现低的孔、渗值。

综上所述,在做辫状河砂体储层预测时,首先应考虑界面,1级界面控制了砂体的几何形态和范围,2级界面控制了单砂体非均质性的宏观特征,3级界面控制了高孔、渗区的分布;其次考虑粒度和岩石相这两个因素,这是砂体沉积特征的直接反映,与物性

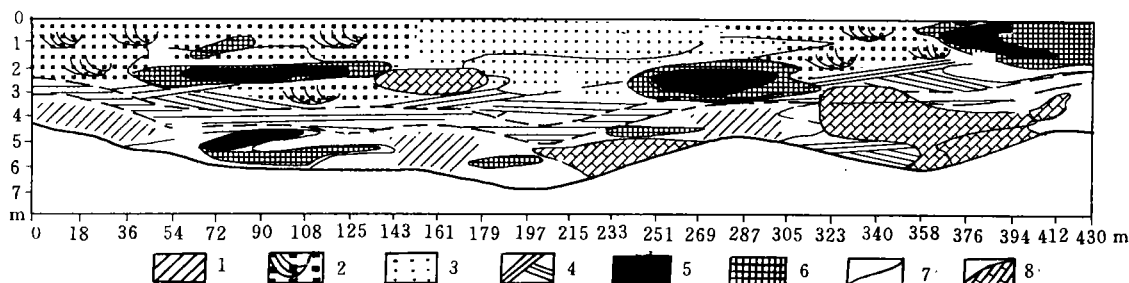


图7 辫状河砂体二维储层地质模型

1. 板状交错层理砂岩相; 2. 冲刷充填层理砂岩相; 3. 块状层理砂岩相; 4. 低角度板状交错层理砂岩相
5. 渗透率大于 $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 6. 渗透率 $3 \sim 6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 7. 孔隙度等值线; 8. 碳酸盐含量大于3%的区域

Fig. 7 2-D reservoir model of braided river sandbodies

有很好的对应关系;最后考虑成岩因素的影响,成岩作用对储层物性的改造受沉积作用控制,在有利的岩石相和粒度范围内,若碳酸盐或其它胶结物超过一定程度(如平均值),则可造成局部低孔、渗带,这是应该引起重视的。

6 结论

(1)划分了辫状河砂体的层次界面,认为划分3级界面是切合实际的,界面层次划分过细,只有理论意义,而无太大的实际意义。

(2)建立了砂岩相与储层物性的关系。实践表明,砂岩相与储层物性能建立起很好的对应关系,代表高能环境的砂岩相总是对应相对较好的物性。

(3)粒度中值、杂基含量与储层物性有显著相关性;胶结物含量对孔隙度的影响大于对渗透率的影响。沉积作用是影响砂体物性的主要因素,成岩作用受沉积作用制约。

(4)辫状河以河道宽浅为特征,侧向迁移迅速,以垂向加积为主,层内非均质性受各次洪泛事件能量大小的控制,最高渗透率出现在水动力强度最大的层段。

在研究工作中,始终得到上级项目负责人裘亦楠、薛叔浩二位专家的关怀和指导,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Miall A D. Lithofacies types and vertical profile models in braided river. *Fluvial Sedimentology*. 1978, 597~604
- 2 Miall A D. Reservoir heterogeneties in fluvial sandstones; lessons from outcrop studies. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(6): 682~697
- 3 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
- 4 裘亦楠, 薛叔浩. 油气储层评价技术. 北京: 石油工业出版社, 1994. 243~250
- 5 裘亦楠. 碎屑岩储层沉积基础. 北京: 石油工业出版社, 1984. 14~19

Reservoir Sedimentology of Braided River Sandbodies ——A case study of the outcrop in Zhangjiakou Region

Wu Tao¹ Wang Jianguo² Wang Defa¹

1(China University of Geosciences, Beijing 100083)

2(Branch School of Daqing Petroleum Institute, Hebei Qinhuangdao 066000)

Abstract

From the view of reservoir sedimentology, this paper analyzed the formation of braided river sandbodies in the Zhangjiakou region, identified three-order bounding surfaces and six types of lithofacies, and discussed the influence of sedimentation and diagenesis on reservoir properties. It was concluded that sedimentation is a dominant factor controlling reservoir properties, and the influence of diagenesis on reservoir properties is affected by sedimentation. Middle grain size and mud content have great influence on reservoir properties, the influence of cements on porosity is greater than that on permeability. It was also showed that there is a close relationship between lithofacies and reservoir properties, lithofacies formed in high energy environment usually are good reservoirs. The control of bounding surface on reservoirs lies in the following: the first order bounding surface controls the geometry and extension of sandbodies, the second one controls the heterogeneity of sandbodies, and the third one controls the distribution of favorable reservoirs. Finally, a 1-D and a 2-D geological reservoir models were established, these models would be instructive for oil production.

Key Words braided river reservoir sedimentology bounding surface lithofacies reservoir model