

吐鲁番坳陷中侏罗统沉积与 储层孔隙发育特征

刘林玉 邸世祥

(西北大学, 陕西西安 710069)

吐鲁番坳陷中侏罗统划分为河流相、三角洲相、扇三角洲相和湖泊相4种沉积类型。西山窑组为曲流河沉积, 三间房组为三角洲相沉积, 三间房-七克台组为扇三角洲和湖泊相沉积。西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘水下分流河道砂体的主要储集空间为溶蚀型次生孔隙, 具有较高的孔隙度和渗透率。三间房-七克台组扇三角洲前缘水下分流河道砂体次生孔隙不发育, 孔隙度和渗透率很低。压实作用导致原生孔隙大量损失, 不稳定组分的溶解则是改善孔隙结构的主要因素。

关键词 沉积相 砂体 储集层 次生溶孔 成岩作用

第一作者简介 刘林玉 男 29岁 讲师 沉积学及储层地质学

吐鲁番坳陷位于吐鲁番-哈密盆地的西部, 面积约为28 600 km²(图1)。中侏罗统自下而上为西山窑组、三间房组和七克台组。西山窑组主要为灰色、深灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰色、灰白色砂岩、含砾砂岩夹煤层, 厚度550~950 m; 三间房-七克台组主要为暗棕色、灰绿色、灰色、杂色泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩、砂岩、砂砾岩及砾岩, 厚度510~930 m。根据目前吐鲁番坳陷油气勘探资料, 中侏罗统碎屑岩是吐鲁番坳陷主要的油气储集层。

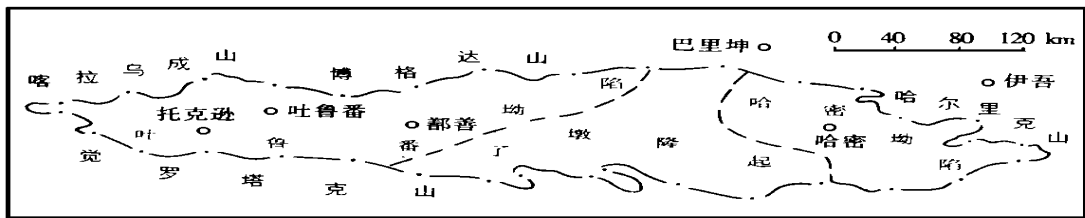


图1 吐鲁番坳陷位置简图

1 沉积相类型及其特征

1.1 河流相

吐鲁番坳陷中侏罗统西山窑组属于曲流河沉积^[1], 具有明显的二元结构, 下部为河道砂坝沉积, 上部为漫滩沼泽沉积(图2-A)。河道砂坝主要为灰色、灰白色长石岩屑砂岩和含砾砂岩夹灰色泥岩和粉砂岩。砂岩碎屑成分主要为凝灰岩、中酸性喷出岩、变质岩与泥岩岩屑和长石、石英。碎屑分选中等—好, 磨圆度较差, 以

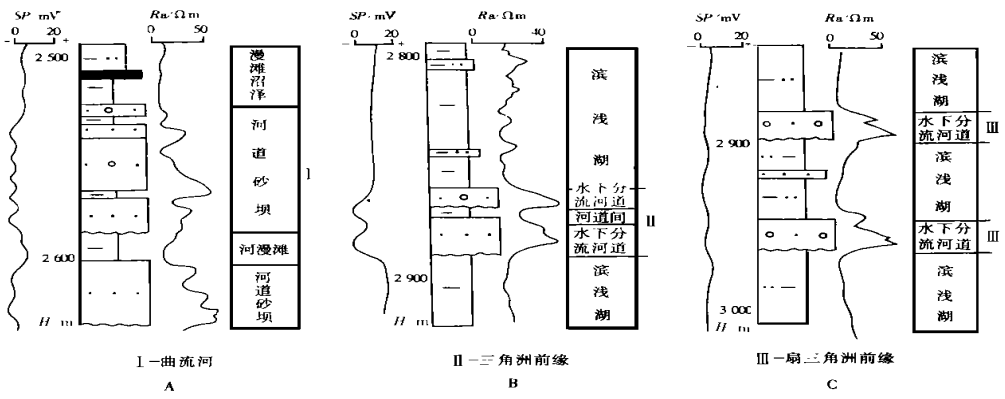


图 2 L1 井河流相(A)、M1 井三角洲相(B)、和 D1 井扇三角洲相(C) 沉积层序

次棱角状为主。砂岩中常见有茎、叶等植物化石。中细砂岩发育大型板状交错层、槽状交错层和平行层理。粉砂岩和泥质粉砂岩发育沙纹交错层。河道砂坝底部含有泥砾、植物茎干等碎屑，常见有冲刷面。视电阻率(R_a)曲线呈中高阻尖峰状或锯齿状，自然电位(SP)曲线呈波状起伏或箱状异常。

漫滩沼泽沉积为灰色、灰黑色泥岩、碳质泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩夹煤层，富含植物化石碎屑。粉砂岩和泥质粉砂岩中出现沙纹交错层，泥质岩中常见水平层理。视电阻率(R_a)曲线呈低阻锯齿状，自然电位(SP)曲线起伏平缓。

1.2 三角洲相

吐鲁番凹陷东南部三间房组发育三角洲相沉积，突出特征是以三角洲前缘水下分流河道砂体为骨架，并直接与滨浅湖泥岩呈冲刷接触(图 2 -B)。水下分流河道砂体主要为灰色长石岩屑砂岩、含砾砂岩夹灰色泥岩，发育平行层理、板状层理和槽状交错层理，岩层中富含植物化石碎片，视电阻率(R_a)曲线和自然电位(SP)曲线均呈峰状。水下河道间沉积主要为灰色泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩。前三角洲沉积主要为灰色泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩，与滨浅湖沉积很难截然分开。河口砂坝不发育，因而在垂向层序缺乏向上变粗的沉积特征。

与扇三角洲前缘砂体相比较，三角洲前缘砂体具有如下特点：(1) 岩石碎屑颗粒相对较细，以砂岩为主；(2) 砂岩碎屑组分中岩屑的相对含量较低，一般低于 50%，岩石类型以长石岩屑砂岩为主，分选较好，结构成熟度较高；(3) 视电阻率(R_a)曲线呈峰状，锯齿不明显，视电阻率(R_a)和自然伽马(GR)值较低，自然电位(SP)曲线常呈钟形。

1.3 扇三角洲相

吐鲁番凹陷北部三间房-七克台组发育扇三角洲，缺乏扇三角洲平原沉积，以扇三角洲前缘水下分流河道砂体为骨架，直接与滨浅湖泥岩呈冲刷接触(图 2 -C)。水下分流河道沉积主要为杂色、棕色和灰色砾岩、砂砾岩和砂岩，岩石碎屑主要为凝灰岩、中酸性喷出岩和泥岩岩屑，石英和长石含量很低，碎屑分选较差，磨圆度以次棱角状-棱角状为主。砾岩和含砾砂岩中砾石直径一般为 3~ 30 mm，最大可达 120 mm，常见平行层理，并可见冲刷面构造。视电阻率(R_a)曲线呈高阻峰状或锯齿状，自然电位(SP)曲线呈波状或箱状。扇三角洲前缘水下分流河道间沉积主要为棕色、灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉细砂岩。

与三角洲前缘砂体相比较，扇三角洲前缘砂体具有如下特征：(1) 岩石碎屑颗粒较粗，以砂、砾岩为主；(2) 砂、砾岩碎屑组分中岩屑的相对含量较高，一般超过 70%，岩石类型以岩屑砂、砾岩为主，碎屑分选较差，结构成熟度较低；(3) 视电阻率(R_a)曲线常呈锯齿状，往往出现多个峰值，视电阻率(R_a)和自然伽马(GR)值较高，自然电位(SP)曲线多呈箱状，有时可见波状。

1.4 湖泊相

发育于吐鲁番凹陷三间房-七克台组中，属于滨浅湖亚相。岩性为灰色、棕色、杂色泥岩、粉砂质泥岩、泥

质粉砂岩夹粉砂岩和砂岩, 缺乏厚层暗色泥岩沉积。发育水平层理和透镜状-波状复合层理。泥岩中富含生长于炎热干燥气候条件的掌鳞杉科植物化石以及松柏类植物化石。视电阻率曲线(R_a) 呈低阻齿状或低阻平直状, 自然电位曲线(SP) 呈平直状。

2 砂体展布特征

2.1 西山窑组

吐鲁番坳陷发育河流沉积体系, 包括河道砂坝和漫滩沼泽沉积, 为潮湿气候条件下沉积形成的。根据倾角测井资料分析, 河流沉积的古流向主要由 SEE 向 NWW 方向。河道砂体构成了西山窑组主要的油气储集体, 砂体碎屑主要来源于坳陷的东南部。根据 52 口钻井资料编制的西山窑组砂岩百分比等值线图显示, 河道砂体主要分布于七克台-煤窑沟一带(图 3), 由于河道的迁移叠置厚度很大, 一般为 550~ 950 m, 其中碎屑岩厚度占地层厚度的 20%~ 45%, 最高可达 65.22%。在七克台-煤窑沟一带两侧, 砂岩百分比很低, 砂层厚度很小。由七克台向煤窑沟方向, 砂岩百分比逐渐降低, 砂体厚度有所减小。

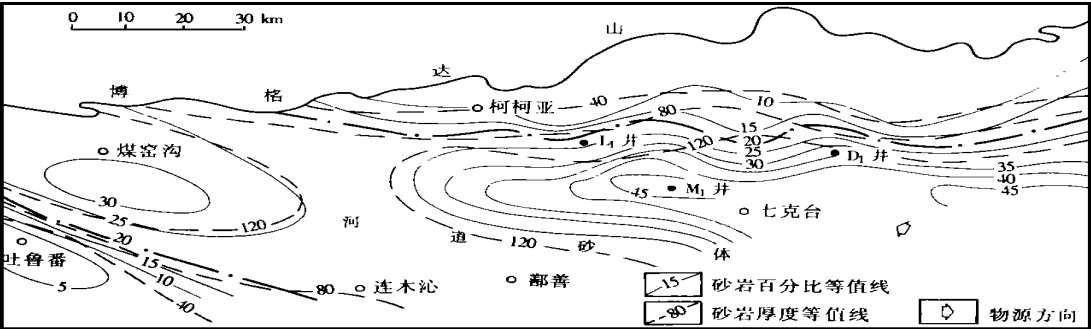


图 3 西山窑组砂岩百分比和厚度等值线图

2.2 三间房组

吐鲁番坳陷逐渐由潮湿气候转变为干燥气候, 形成红色与灰色相间的滨浅湖沉积。坳陷东南部, 河流携带大量碎屑进入滨浅湖后形成三角洲沉积, 其物源为坳陷东南方; 坳陷北部, 山前冲积扇直接进入滨浅湖后形成扇三角洲沉积, 物源为坳陷之北。其中三角洲前缘水下分流河道砂体和扇三角洲前缘水下分流河道砂体构成三间房组主要的油气储集体。利用 54 口钻井资料编制的三间房组砂、砾岩百分比等值线图显示, 三角洲和扇三角洲前缘砂体的碎屑岩厚度占地层厚度的 20%~ 50%, 最高可达 55.5%。三角洲前缘砂体分布于坳陷的东南部, 主要由长石岩屑砂岩组成, 由东南向西北方向砂、砾岩百分比逐渐减小, 三角洲前缘砂体逐渐变薄。扇三角洲前缘砂体分布于坳陷北部, 主要由岩屑砂、砾岩组成, 由北向南砂、砾岩百分比逐渐降低, 砂体厚度逐渐变小并且砂、砾岩中粗碎屑含量逐渐降低(图 4)。

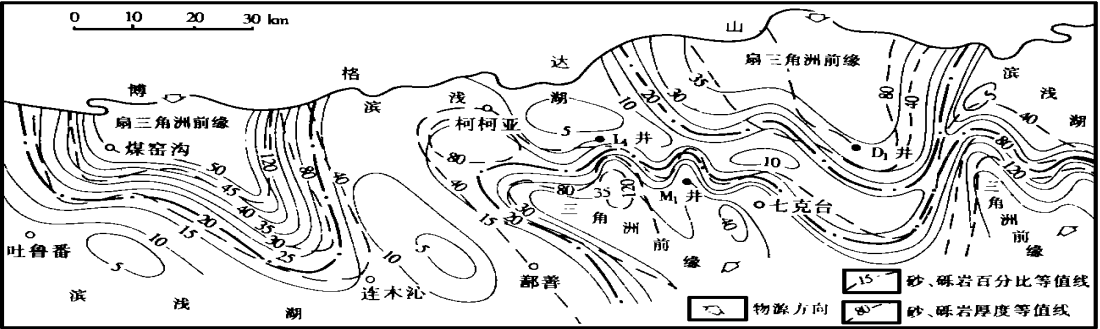


图 4 三间房组砂、砾岩百分比和厚度等值线图

2.3 七克台期

吐鲁番坳陷东北部扇三角洲沉积是三间房期扇三角洲沉积的继续, 形成一套巨厚的粗碎屑沉积。扇三角洲前缘砂体构成了七克台组主要的油气储集体, 砂砾岩厚度占地层厚度的 20%~ 70%, 最高为 73%, 由北向南砂、砾岩百分比逐渐降低, 砂体厚度变小, 并且粗碎屑含量逐渐降低(图 5)。

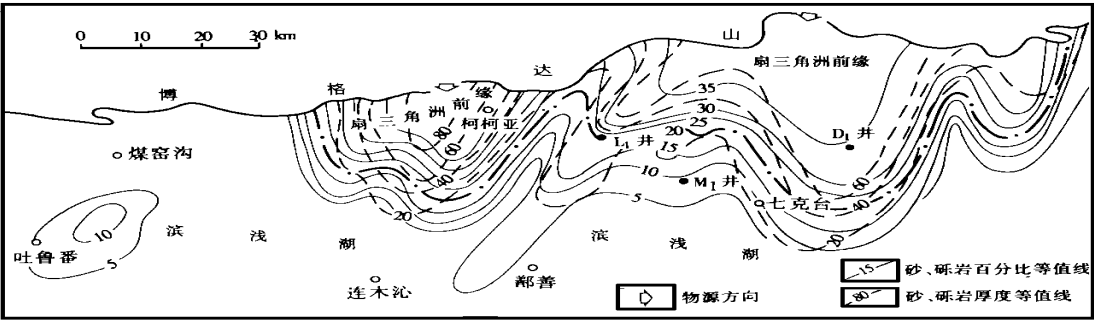


图5 七克台组砂、砾岩百分比和厚度等值线图

3 孔隙发育特征

3.1 分布特征

吐鲁番坳陷中侏罗统河道砂体、三角洲前缘砂体和扇三角洲前缘砂体中发育的大量原生孔隙, 经过压实作用、溶蚀作用等一系列成岩作用改造后, 形成了组成砂体孔隙网络的多种孔隙类型^[2], 其中原生孔隙包括残余粒间孔隙和粘土杂基微孔隙, 次生孔隙包括溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙、自生矿物晶间微孔隙和裂缝孔隙。

西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘砂体发育粒间、粒内等溶蚀型次生孔隙, 同时伴有自生高岭石晶间微孔隙, 此外有残余粒间孔隙和少量裂缝。根据 35 个砂岩样品研究发现, 砂岩铸体薄片面孔率为 4%~ 9%, 最高可达 15%, 其中溶蚀粒间孔隙占 61.5%, 溶蚀粒内孔隙占 9.5%, 残余粒间孔隙占 18.3%, 填隙物内微孔隙占 10.5%, 裂缝占 0.2%。孔隙分布相对较均匀, 连通性较好。砂岩以溶蚀孔隙型孔隙组合为主, 局部层段有致密型孔隙组合^[3]。三间房-七克台组扇三角洲前缘砂体中溶蚀型次生孔隙和裂缝型次生孔隙均不发育, 仅分布有少量残余粒间孔隙和填隙物内微孔隙, 砂岩铸体薄片面孔率绝大多数低于 4%, 一般为 0.5%~ 2%, 孔隙分布很不均匀且连通性很差, 具致密型孔隙组合。

沉积砂体的孔隙发育特征决定了储集层的物理性质。根据 35 个砂岩样品分析, 西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘砂体, 因发育次生孔隙而具有较高的孔隙度和渗透率, 孔隙度最高可达 25%, 渗透率最高可达 $1\,145 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 油气储集性较好。三间房-七克台组扇三角洲前缘砂体虽然厚度较大, 但因其有效孔隙发育差, 储集层孔隙度和渗透率很低, 孔隙度低于 10%, 渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 油气储集性很差(表 1)。

表 1 吐鲁番坳陷中侏罗统储集层的物理性质

层 位	储集层类型	薄片面孔率/ %	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力/ MPa
西山窑组	河道砂体	4~ 7	8~ 18	1~ 24	0.1~ 1
三间房组	三角洲前缘砂体	4~ 9	8~ 25	2~ 1 145	0.03~ 0.6
三间房-七克台组	扇三角洲前缘砂体	0.5~ 2	4~ 10	0.01~ 1	1.5~ 3

3.2 影响孔隙发育的主要因素

3.2.1 压实作用和胶结作用

在埋藏成岩过程中,中侏罗统各类砂体发生了强烈的压实作用,其中三间房-七克台组扇三角洲前缘砂体遭受的压实作用最为强烈。该类砂体物源为盆地的北部,岩石类型为岩屑砂砾岩,石英、长石和岩屑的平均相对含量分别为3.07%、7.4%和89.5%,岩屑以柔性的凝灰岩、喷出岩和泥岩等碎屑组分为主。在上覆压力作用下柔性岩屑发生强烈变形,甚至发生“假杂基”化,碎屑颗粒呈线-凹凸状接触。强烈的压实作用导致砂岩的原生孔隙绝大部分消失,形成致密型孔隙结构。

西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘砂体,在压实作用改造下原生粒间孔隙也大幅度减少,但该类砂体物源为盆地的东南部,岩石类型为长石岩屑砂岩,石英、长石和岩屑的平均相对含量分别为22.09%、29.06%和48.85%,石英和长石等刚性碎屑含量相对较高,因而压实作用强度相对较弱,碎屑颗粒呈点-线状和线状接触。砂体经压实作用改造后保留了相对较多的残余粒间孔隙。

除了压实作用之外,沉积砂体在成岩过程中形成的自生矿物胶结物的充填作用也导致砂岩的孔隙结构变差。中侏罗统砂岩的胶结物主要为方解石、粘土矿物和少量自生石英和自生长石矿物等。三间房-七克台组扇三角洲前缘砂体被强烈的压实作用改造后残留的极少量原生孔隙,经过自生粘土矿物、方解石和少量钠长石胶结充填后,基本上消失殆尽,储集层的孔隙空间以少量填隙物内微孔隙为主。西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘砂体经过自生粘土矿物、方解石和少量自生石英的胶结改造之后,残余粒间孔隙也明显减少。根据钻井取芯资料分析,西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘砂体中自生矿物胶结物的含量一般为1%~10%,分布非常不均匀。在残余粒间孔隙较发育的砂岩中,胶结物的含量很低,一般低于4%,砂岩铸体薄片面孔率一般大于5%;在胶结物含量较高(大于7%)的砂岩中,残余粒间孔隙发育较差,砂岩铸体薄片面孔率一般低于4%。

3.2.2 不稳定组分的溶解

三间房-七克台组扇三角洲前缘砂体,在强烈的压实作用改造下残余的有效孔隙很少,砂岩缺乏发生溶蚀作用所必需的孔隙空间,因而在成岩过程中该类砂体发生的溶蚀作用很弱,未能有效地改善砂岩的致密型孔隙结构,所以砂岩的储集性很差。

西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘砂体,经压实作用和胶结作用改造后保留的残余粒间孔隙和构造活动产生的裂缝孔隙,为孔隙介质的流动和溶蚀作用的发生提供了必要的孔隙空间;同时砂岩中含有较多的方解石胶结物和长石碎屑等不稳定组分,这些组分为溶蚀作用的发生提供了物质基础^[4]。根据钻井取芯资料分析,吐鲁番坳陷中侏罗统有机质的镜煤反射率为0.6%~0.7%,热解最大温度为430~438℃,伊/蒙混层粘土矿物中蒙脱石的含量5%~35%,这说明储集层已进入成熟阶段。在该阶段有机质分解产生的有机酸和CO₂使孔隙介质呈酸性^[5],在酸性介质条件下,砂体中的方解石胶结物和长石碎屑等发生溶解,使砂岩在残余粒间孔隙的基础上形成了较发育的溶蚀型次生孔隙,从而有效地改善了西山窑组河道砂岩和三间房组三角洲前缘砂岩储集层的孔隙结构,使其具有较好的油气储集性能。油气勘探资料显示,吐鲁番坳陷中侏罗统的主力油气产层分布于三间房组的三角洲前缘砂体和西山窑组的河道砂体。

4 结论

(1) 吐鲁番坳陷中侏罗统沉积分为河流相、三角洲相、扇三角洲相和湖泊相4种类型。西山窑组河道砂体、三间房组三角洲前缘砂体和三间房-七克台组扇三角洲前缘砂体构成了中侏罗统主要的油气储集体。

(2) 西山窑组河道砂体和三间房组三角洲前缘砂体发育溶蚀型次生孔隙,是储集性能较好的溶蚀孔隙型油气储集体。

(3) 三间房-七克台组扇三角洲前缘砂体的有效孔隙不发育,储集性能很差。

(4) 强烈的压实作用导致砂岩损失了大量原生孔隙,砂岩不稳定组分的溶解是改善砂岩孔隙结构的主要因素。

(下转第260页)

沉降中心的迁移与油气的形成规律。

作者在 22 篇论文中,以沉积盆地作为油气形成的基本地质构造单元,论述了含油气盆地的形成机制、构造特征、类型、结构、沉积相模式、生油气环境、油气藏类型、分布规律,以及中国油气资源的分布,形成了较为完整的理论体系,提出沉积盆地控制油气赋存的 10 个因素,坚持构造是主导、沉积是基础、生油是关键、保存是条件的油气资源评价原则,将我国已发现的油气藏类型划分为 5 类 26 亚类,并按盆地地壳演化、构造样式、沉积模式的不同,划分为多种分布模式;从大地构造环境、古地理轮廓、古气候条件、沉积相特征、地层层序、古生物群落等方面,论述了各时代的岩相古地理,明确了各时期地层的含油气远景,这些都对我国的油气勘探有重要意义。

编选的 22 篇论文,代表了田在艺教授在大地构造学、构造地质学、沉积学、石油地质科学领域内的重要贡献和成就,其学术思想自成系统,富有创新精神;其研究成果是中国石油地质界知识宝库的重要组成部分,反映了我国石油地质学的科学进展,对今后的油气勘探实践,具有重要的指导意义。同时它也是一部很好的科研、教学参考书。

(上接第 251 页)

参 考 文 献

1 柯林森 J D, 卢思 J. 现代和古代河流沉积体系. 裘亦楠, 甘克文, 许仕策等译. 北京: 石油工业出版社, 1991. 333~ 347
2 邱世祥. 中国碎屑岩储集层的孔隙结构. 西安: 西北大学出版社, 1991. 1~ 6, 210~ 220
3 王英华, 鲍志东, 朱筱敏. 沉积学及岩相古地理学新进展. 北京: 石油工业出版社, 1995. 525~ 527
4 刘林玉. 吐鲁番-哈密盆地中生界砂岩次生孔隙研究. 石油实验地质, 1996, 18(3): 317~ 326
5 Surdam R C, Grossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis. AAPG Bulletin, 1989, 73 (1): 1~ 23

CHARACTERISTICS OF MIDDLE JURASSIC SEDIMENTATION
AND RESERVOIR PORE EVOLUTION
IN TURPAN DEPRESSION

Liu Linyu Di Shixiang
(Department of Geology, Northwest University, Xian, Shaanxi)

Abstract

Middle Jurassic Series in Turpan Depression could be divided into four facies such as river, delta, fan-delta and lake facies. The Xishanyao Formation is meandering river facies, the Sanjianfang Formation is delta facies, the Sanjianfang-Qiketai Formations contain delta and lacustrine facies deposits. The river channel sandbodies in the Xishanyao Formation and the subaqueous distributary channel sandbodies in the delta front of Sanjianfang Formation contain mainly secondary solution pores, and have high porosity and high permeability. The subaqueous distributary channel sandbodies in the fan-delta front of Sanjianfang-Qiketai Formations contain poor secondary pores, they are denes and poor reservoir bodies with low porosity and permeability. The loss of primary porosity is caused by compaction, and pore texture reformation is resulted from the solution of unstable components.