

# 吐鲁番坳陷西山窑组富煤的河流沉积 与储集层的成岩作用研究

刘林玉 柳益群 李文厚

(西北大学地质系,西安)

**[内容提要]** 吐鲁番坳陷西山窑组( $J_2x$ )发育一套含煤的陆相沉积地层,本文根据钻井资料进行研究后认为这套地层属于曲流河沉积,并进一步划分出河道沙坝和漫滩沼泽等沉积类型。煤层形成于漫滩沼泽沉积环境。曲流河道砂体是主要的油气储集体。位于坳陷东南区的曲流带河道砂岩复合体是储集砂岩最发育的地区。储集砂岩类型主要为矿物成熟度较低的岩屑砂岩和长石岩屑砂岩。坳陷东南区复合体河道砂岩以长石岩屑砂岩为主,而坳陷北区河道砂岩以岩屑砂岩为主。西山窑组储集层主要的成岩作用为压实作用、胶结作用和溶解作用。坳陷东南区复合体砂岩典型的成岩作用为溶解作用,溶解作用导致砂岩形成以溶蚀孔隙为主的孔隙空间。坳陷北区河道砂岩典型的成岩作用为压实作用,压实作用导致砂岩储集层的物性很差。

**关键词** 曲流河 砂岩复合体 储集层 成岩作用

吐鲁番-哈密盆地位于新疆维吾尔自治区东部,为一东西向延伸的狭长形盆地。吐鲁番坳陷位于盆地西部,面积约28600km<sup>2</sup>(图1)。吐鲁番坳陷西山窑组( $J_2x$ )为一套含煤的陆相沉

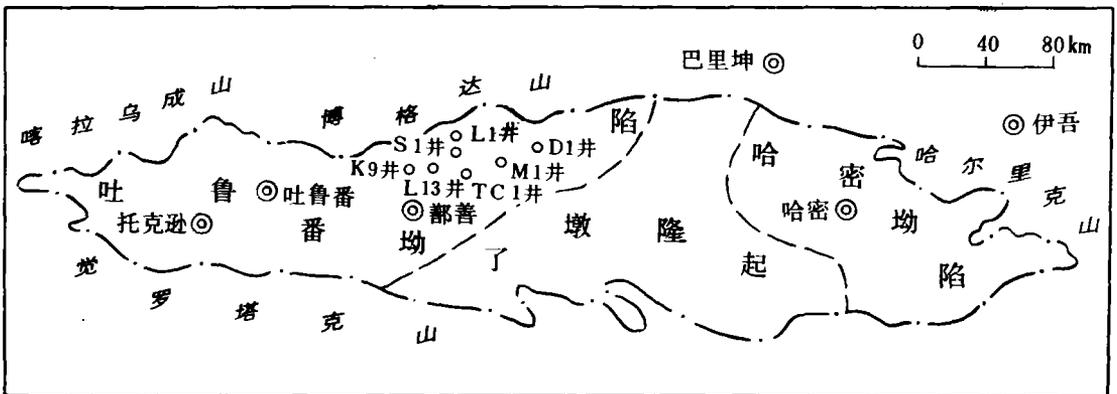


图1 吐鲁番坳陷位置简图  
Fig. 1 Location of the Turpan depression

积地层,厚度约为550~1200m,其岩性主要为灰色、灰白色砂岩、含砾砂岩及灰色、深灰色泥岩、粉砂质泥岩、灰黑色碳质泥岩和煤层。我们研究后认为西山窑组含煤地层属于河流沉积

的产物,河流沉积形成的河道砂体在成岩过程中发生了一系列成岩作用和变化。西山窑组河道砂岩是吐鲁番坳陷主要的油气储集岩之一。

### 1 河流沉积特征

吐鲁番坳陷西山窑组含煤地层属于曲流河沉积,具有明显的二元结构,下部碎屑岩为河道沙坝沉积,上部泥岩和煤层为漫滩沼泽沉积<sup>[1]</sup>(图2)。该岩性组合具有完整的粒度向上变细的层序,为正韵律沉积。

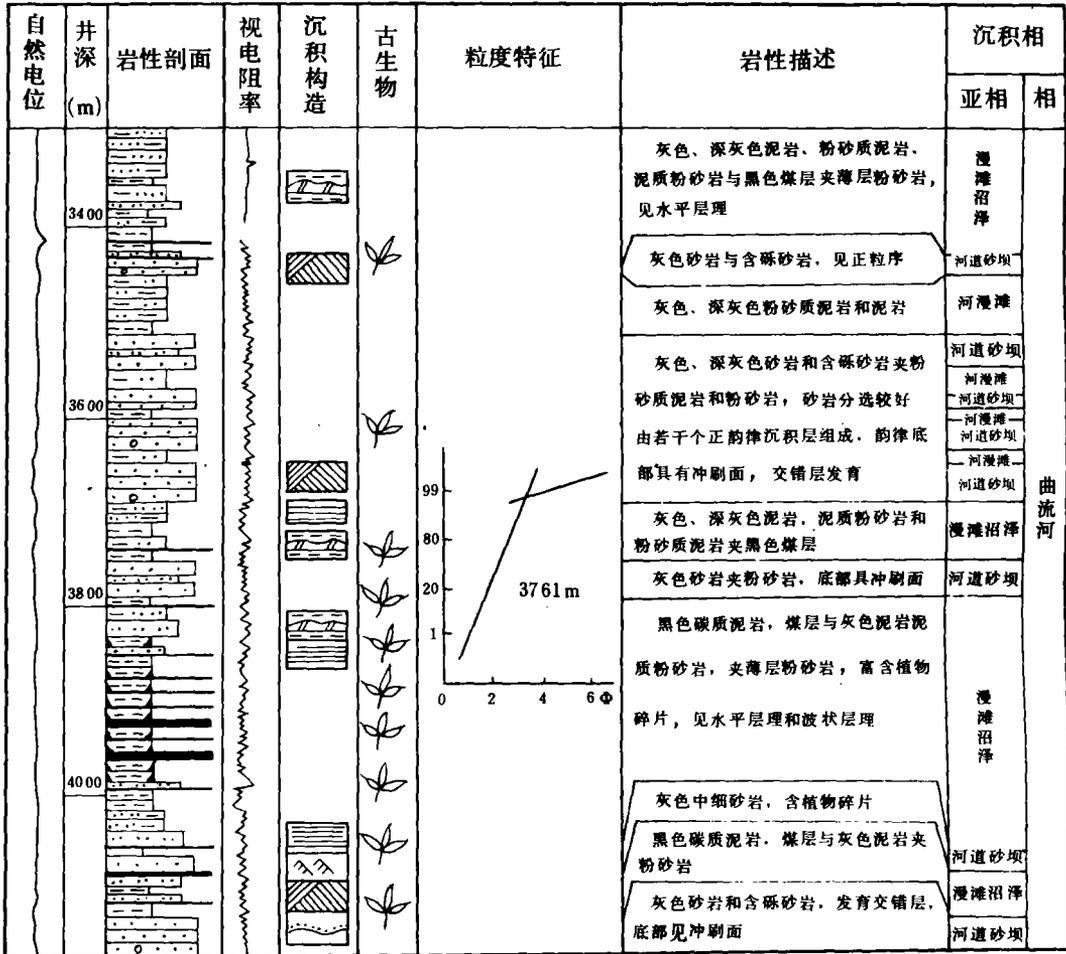


图2 吐鲁番坳陷(TC1井)西山窑组(J<sub>2</sub>x)岩性岩相柱状剖面图  
 Fig. 2 Columnar section showing lithology and sedimentary facies in the Xishanyao Formation, Turpan depression, Xinjiang

#### 1.1 河道沙坝

河道沙坝主要为灰色、灰白色砂岩和含砾砂岩,它是曲流河道侧向迁移过程中在每个曲流段的凸岸侧向加积形成的边滩沙坝。河道沙坝具有典型的“点坝层序”<sup>[2]</sup>。沙坝底部以冲刷面开始,与下伏泥岩呈冲刷接触,上覆含砾砂岩,砾石为物源区的火成岩或变质岩碎屑,同时含有泥砾;向上依次变为中砂岩、砂岩和粉砂岩。沙坝下部砂岩发育大型的板状交错层或槽状交错层,这些交错层在岩心中表现为一组斜层理,同时还出现平行层理,向上交错层规模

变小,在粉砂岩中发育沙纹交错层。河道沙坝在电性上视电阻率曲线呈中高阻尖峰状或锯齿状,自然电位曲线呈波状起伏。河道沙坝内各个侧积砂体的规模较小,它们之间可以呈冲刷接触,使河道沙坝成为若干个正韵律砂体组合的叠加砂体。河道砂体含有植物化石,砂岩概率曲线以无滚动组分的两段式为主,有时出现正常的三段式。

## 1.2 漫滩沼泽沉积

漫滩沼泽沉积在本区非常发育,主要为灰色、深灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、灰黑色碳质泥岩和煤层夹粉砂岩。煤层的下伏层和上覆层多为碳质泥岩,侧向上也可递变为碳质泥岩。煤层厚度一般为数厘米至数十米。由坳陷东南区向西北区,煤层由薄变厚。曲流河侧向延移过程中,在河道强烈弯曲的地段,河流在洪水期可因截弯取直或者决口造成河流改道后形成废弃河道。废弃的曲流带被植物碎屑堆积后形成排水不良的漫滩沼泽。在本区西山窑组漫滩沼泽沉积中发现的微体古生物化石以蕨类植物孢子和裸子植物花粉为主,蕨类植物以喜湿热的桫欏科植物为主,常见*Osmundacidites*, *Neoraistrickia* 和 *Lycopodium-sporites*, 裸子植物以银杏-苏铁类及松柏类为主,常见*Cycadopites*。这反映出中侏罗世西山窑期吐鲁番地区处于湿润的温带—亚热带气候,具有草木-森林型植被。这些不同的古植物群分布在排水不良的漫滩沼泽中,经过埋藏成岩作用之后形成煤层。漫滩沼泽相泥岩中发育水平层理,粉砂岩和泥质粉砂岩中出现沙纹交错层。漫滩沼泽沉积在电性上表现为视电阻率曲线呈低阻锯齿状,自然电位曲线呈平缓起伏或平直状。

在曲流河的搬运沉积过程中,曲流河道连续不断地迁移叠置,使各个曲流点沙坝连通形成曲流带河道砂体。曲流带河道砂体与广泛发育的漫滩沼泽相含煤泥质沉积,构成了吐鲁番坳陷西山窑组在剖面上砂、泥、煤间互分布,在平面上砂、泥、煤相变频繁的沉积体系。曲流带河道砂体构成了本区西山窑组主要的油气储集体。

## 2 河道砂体的分布

在吐鲁番坳陷,受东西向和北西向线性构造带的影响,西山窑组曲流带沉积总体上呈东西向延伸,在坳陷西部向北西向延伸。在西山窑期,沿平行构造带方向发生的沉降作用控制了曲流带沉积的垂向堆积和群集。根据西山窑组碎屑岩百分比等值线图分析(图3),吐鲁番坳陷在西山窑期形成两个大型的曲流带河道砂体堆积形成的复合体。一个复合体位于坳陷东南部的七克台地区,其碎屑岩百分比一般大于30%,最高为65.22%,砂体厚度约80~150m,砂体大面积连通,且侧向连续性好。复合体近东西向延伸,中间部位砂体连通性好,砂层厚度大;至坳陷北部方向,碎屑岩百分比降低,砂体连通性逐渐变差。另一个复合体位于坳陷西北部的煤窑沟一带,其碎屑岩百分比一般为25%~35%,复合体规模较小,呈南东-北西向延伸,砂体连通性较差,砂层厚度相对较小,至东北方向和西南方向碎屑岩百分比大幅度降至10%以下。曲流带沉积形成的砂岩复合体控制了西山窑组主要油气储集层的空间展布。吐鲁番坳陷东南部是西山窑组储集层最发育的地区。

根据目前油气勘探资料,吐鲁番坳陷西北区砂岩复合体的含油性较差,西山窑组的油气层主要分布于坳陷东南区的砂岩复合体中。根据目前油田开发中砂层划分方案,坳陷东南区西山窑组可划分为 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  和  $X_4$  四个砂层组。其中 $X_{1+2}$ 砂岩组中砂岩厚度约为40~110m,其中油气层厚约为2~32m,砂岩复合体南北分带明显,复合体南部砂体连续性好,砂岩厚度约为80~110m;北部砂体连续性变差,砂岩厚度约为30~50m,反映了河道主体位于复合体

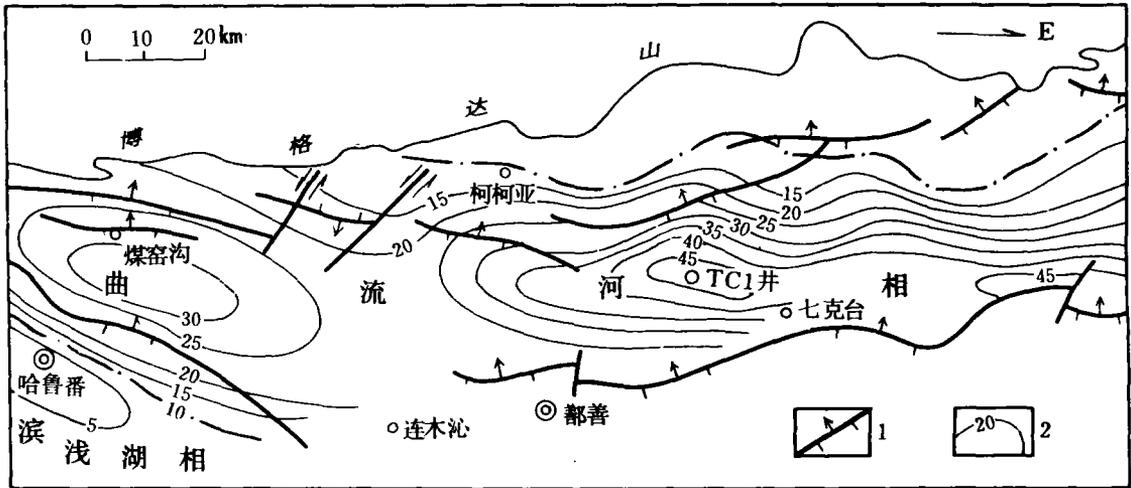


图3 吐鲁番坳陷主要线性构造及西山窑组碎屑岩百分比等值线图

1. 断裂; 2. 碎屑岩百分比等值线

Fig. 3 Major linear structures and percentage isoline of the clastic rocks in the Xishanyao Formation, Turpan depression, Xinjiang

1=fault; 2=percentage isoline of clastic rocks

南部。X<sub>3+4</sub>砂岩组中砂岩厚度约为50~110m,在复合体中分布均匀,并且连续性好,但其中油气层分布面积较小,且油气层厚度相对较小,为0~17m。

### 3 储集层的岩石学特征

大量的薄片分析资料反映出西山窑组储集层的岩石类型属于岩屑砂岩类,砂岩的矿物成熟度比较低,岩屑的相对含量很高(一般高于50%),为典型的贫石英砂岩。其中岩屑组分主要为凝灰岩、中酸性喷出岩和泥岩,此外有少量变质岩和碳酸盐岩屑。碎屑岩中碎屑的磨圆程度较差,多为次棱角状;但分选性较好,一般为中—好,并且泥质杂基含量低,一般低于5%。这说明西山窑组河流沉积物为近物源搬运沉积形成的,河道沉积的碎屑经过了一定程度的分选。

吐鲁番坳陷不同地区曲流河道砂岩的成分存在着明显差异。坳陷东南区河道砂岩复合体距物源剥蚀区相对较远(如TC1井),河道砂岩经过了一定距离的搬运,砂岩的矿物成熟度相对较高,岩屑含量相对较低,砂岩的岩石类型以长石岩屑砂岩为主,其中石英碎屑的相对体积分数为10%~32%,平均为23%;长石碎屑的相对体积分数为18%~34%,平均为25%;岩屑的相对体积分数为40%~65%,平均为52%。在坳陷北部地区(如L1井和S1井),河道砂岩接近物源,砂岩的矿物成熟度相对较低,砂岩为岩屑砂岩和长石岩屑砂岩的复合类型,岩屑含量相对较高,其中石英碎屑的相对体积分数为1%~35%,平均为11.2%;长石碎屑的相对体积分数为4%~32%,平均为11.5%,岩屑的相对体积分数为38%~92%,平均为77.3%。含有不同组分的碎屑沉积物在埋藏成岩过程中必然具有不同的成岩变化特征。

### 4 储集层的成岩作用特征

#### 4.1 储集层主要的成岩作用

西山窑组曲流河沉积形成的河道砂体在埋藏成岩中发生了一系列成岩变化,其中主要

的成岩作用为机械压实作用、自生粘土矿物与碳酸盐矿物的胶结作用和砂岩的溶解作用。

#### 4.1.1 机械压实作用

西山窑组河道砂岩在成岩过程中发生了强烈的机械压实作用,这是由砂岩的岩石学性质所决定的。西山窑组储集岩属于贫石英的火山岩屑砂岩,大多数砂岩碎屑组分中凝灰岩、中酸性喷出岩岩屑和泥岩岩屑等柔性组分在机械压实作用下发生强烈变形,碎屑颗粒间呈线—凹凸状接触,部分柔性碎屑被挤压进颗粒之间发生“假杂基”化,同时碎屑颗粒发生定向—一半定向排列;仅有极少量砂岩因受成岩早期胶结物支撑作用的影响而表现出相对较弱的机械压实作用,其中在坳陷北部地区储集岩主要为岩屑砂岩,机械压实作用尤为强烈。而在坳陷东南地区,储集岩以长石岩屑砂岩为主,碎屑组分中柔性碎屑含量相对较低,刚性碎屑含量相对较高,这导致岩屑在成岩中变形程度相对较差,该区砂岩是吐鲁番坳陷机械压实作用相对较弱的储集岩。在机械压实作用改造下,碎屑岩的原生粒间孔隙大量减少,特别是岩屑含量较高的岩屑砂岩的原生粒间孔隙几乎损失殆尽。

#### 4.1.2 自生粘土矿物的胶结作用

西山窑组砂岩的自生粘土矿物为高岭石、伊/蒙混层、伊利石和绿泥石,它们是储集层主要的胶结物之一,其体积分数一般为1%~5%。伊/蒙混层和伊利石呈不规则弯曲的片状或条带状垂直于碎屑表面分布,呈薄膜式胶结。绿泥石呈叶片状分布于碎屑表面也形成薄膜式胶结。高岭石呈书页状、假六方板状或蠕虫状充填于碎屑之间,呈孔隙式胶结。

岩石学特征表明,在成岩早期低温低压的浅埋藏阶段,火山岩岩屑发生了强烈的水化水解作用,导致凝灰岩和喷出岩岩屑的不稳定组分发生严重的蒙脱石化和绿泥石化。水化水解作用使凝灰岩和喷出岩岩屑表面模糊,颗粒界线不清,与泥岩岩屑很难截然分开。在成岩过程中蒙脱石粘土矿物在高温高压的深埋藏环境中逐渐转变为伊/蒙混层和伊利石。绿泥石、伊/蒙混层和伊利石粘土矿物胶结物是火山岩岩屑在成岩早期水化水解的矿物及其成岩转化的产物。而高岭石粘土矿物主要是长石碎屑在成岩成熟期发生溶解作用形成的自生矿物。根据取心砂岩资料分析发现,在西山窑组储集层中,长石岩屑砂岩以高岭石含量高、伊利石和伊/蒙混层含量低为特征,岩屑砂岩以高岭石含量低,伊利石和伊/蒙混层含量高为特征,这说明岩屑砂岩中火山岩岩屑在成岩早期的水化水解作用较为显著,而长石岩屑砂岩中长石碎屑在成岩成熟期的溶解作用较为显著。自生粘土矿物的充填使原生粒间孔隙进一步减少,同时形成自生粘土矿物晶间微孔隙。

#### 4.1.3 碳酸盐的胶结作用

碳酸盐是西山窑组砂岩中的胶结物之一,其体积分数一般为0%~10%,主要为方解石,次为少量铁方解石。碳酸盐胶结物在部分砂岩中分布而且分布很不均匀。方解石胶结物呈他形晶或嵌晶状分布于碎屑之间,常见方解石交代石英和长石碎屑。铁方解石析出晚于方解石,常呈他形晶零星分布于砂岩中。在方解石胶结物含量较高的局部砂岩中,碎屑多呈点状接触,机械压实作用较弱。方解石的胶结作用一方面导致原生粒间孔隙大量减少,另一方面又为溶蚀型次生孔隙的形成提供了物质基础。

#### 4.1.4 溶解作用

影响砂岩储集层溶解作用强弱的主要因素为有效河道砂体的形成和保存、煤系地层中有机质的成岩分解和砂岩不稳定组分的化学分解。

(1)有效河道砂体的形成和保存是发生溶解作用的前提

有效砂体是指含有较多有效原生孔隙的砂岩沉积体<sup>[3]</sup>。砂体中的原生孔隙具较好的连通性,是孔隙水介质循环流动和砂岩组分发生溶解的必要空间。西山窑组曲流带河道砂体形成于较强的水动力环境,碎屑颗粒粗,砂层厚度大,原生粒间孔隙发育,特别是吐鲁番坳陷东南区的曲流河道砂岩复合体,砂层连续性好,是西山窑组沉积形成的有效砂体。

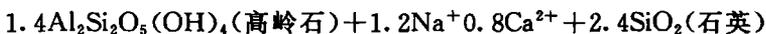
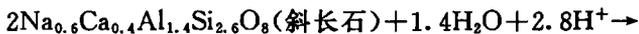
有效砂体的保存取决于成岩作用的强度。在吐鲁番坳陷北部地区,砂岩储集层因遭受强烈的机械压实作用而使原生粒间孔隙丧失殆尽,结果导致河道砂体遭到破坏而变为无效河道砂体。而在坳陷东南区,砂岩储集层遭受的压实作用相对较弱,有效河道砂体没有遭到完全破坏,砂体经过压实作用之后仍然保留了一定量的残余粒间孔隙,为砂岩发生溶解作用提供了必要的孔隙空间。

(2)煤系地层中有机质的成岩分解导致砂体孔隙介质的pH值降低是发生溶解作用的主要因素

根据钻井取心资料,西山窑组有机质的镜煤反射率为0.5~0.8,热解最大温度为430~438℃,砂岩中伊/蒙混层的蒙脱石的体积分数为5%~40%,这说明西山窑组地层进入了中成岩成熟期。在这一时期,漫滩沼泽沉积形成的含煤地层中的有机质分解产生了大量的有机酸和CO<sub>2</sub>,这些物质进入含有较多残余粒间孔隙的有效河道砂体之后,砂岩孔隙流体的pH值大幅度降低,处于酸性环境。有机质成岩分解后导致有效砂体孔隙水介质的pH值降低,为砂岩发生溶解作用提供了必要的地球化学环境。无效河道砂体因缺乏孔隙水介质循环流动所需要的孔隙空间而失去了孔隙水pH值降低的可能性。

(3)砂岩不稳定组分的化学分解是发生溶解作用的结果

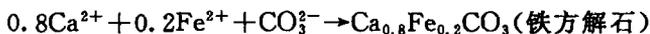
在吐鲁番坳陷东南区,处于中成岩成熟期的河道砂岩复合体中长石碎屑和方解石胶结物等不稳定组分在酸性介质环境中很不稳定。长石碎屑在酸性介质环境中发生分解,形成自生高岭石-石英矿物组合:



西山窑组砂岩中广泛分布的自生高岭石胶结物,说明长石碎屑在成岩成熟期发生了强烈的化学分解。在成岩早期形成的方解石胶结物,在成岩成熟期的酸性介质环境中也发生强烈的分解:



方解石分解产生的CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,如果与孔隙流体中的Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>结合,可形成晚期的铁方解石胶结物:



砂岩不稳定组分强烈的化学分解,在坳陷东南区河道砂岩复合体中形成了较发育的溶蚀粒间孔隙和溶蚀粒内孔隙等溶蚀型次生孔隙。在吐鲁番坳陷北部地区,因河道砂体遭到破坏后变为无效砂体,砂岩组分的化学分解很不明显,储集层的溶解作用非常微弱,次生孔隙很不发育。

## 4.2 成岩作用对储集层孔隙结构的改造

吐鲁番坳陷西山窑组储集层原生孔隙结构在成岩过程中遭到强烈破坏,原生粒间孔隙大量减少,形成了由多种类型的孔隙组成的孔隙空间网络。在吐鲁番坳陷,不同地区砂岩

成岩作用的非均一性决定了各类孔隙在西山窑组储集层的分布很不均匀<sup>[4,5]</sup>。在坳陷东南区,曲流带河道砂岩复合体以强烈的溶蚀作用为成岩特征,储集层具有以溶蚀型次生孔隙为主体的多种类型孔隙的组合,包括残余粒间孔隙、溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙和填隙物内孔隙。孔隙连通性好。砂岩铸体薄片面孔率一般为3%~10%,最高为17%,其中溶蚀粒间孔隙和溶蚀粒内孔隙一般为2%~9%,占总孔隙的73.6%。多数砂岩具有孔隙型孔隙结构,仅有少数砂岩具有致密型孔隙结构。在坳陷北部,河道砂岩以强烈的机械压实作用为成岩特征,储集层原生粒间孔隙和次生粒间孔隙均不发育,孔隙类型以填隙物内孔隙为主,偶见极少量残余粒间孔隙和溶蚀粒内孔隙。孔隙连通性很差。砂岩铸体薄片面孔率多数低于1%,砂岩具有致密型孔隙结构。河道砂岩的孔隙发育特征决定了西山窑组储集层的物性特征。在吐鲁番坳陷东南区,复合体砂岩的孔隙度一般为8%~15%,最高为22.8%;渗透率一般为 $(1\sim72)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,最高为 $2862\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,储集层具有相对较好的油气储集性能。在坳陷北部地区,河道砂岩的孔隙度一般为4%~8%,最高为10%;渗透率多数为 $(0.1\sim1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,储集层的油气储集性很差。

综上所述,西山窑组富煤的曲流河沉积控制了储集层的空间展布,曲流带沉积形成的砂岩复合体构成了西山窑组主要的油气储集体。坳陷北部河道砂岩因富含柔性碎屑而在强烈的机械压实作用改造下成为储集性能很差的致密型储集岩。坳陷东南区复合体砂岩在溶解作用改造下成为储集性能较好的孔隙型储集岩。有效河道砂体的形成和保存、煤系地层中有有机质的成岩分解和砂体孔隙水介质pH值的降低以及砂岩不稳定组分的化学分解是造成坳陷东南区西山窑组储集层发生大规模溶解作用的主要原因。

### 参 考 文 献

- 1 Flores R M,美国蒙大拿州和怀俄明州粉河盆地北部富煤的第三系河流沉积的盆地相分析. 见J D Collinson and J Lewin 编,裘亦楠、甘克文等译. 现代和古代河流沉积体系. 北京:石油工业出版社,1991,333~347
- 2 裘亦楠、许仕策、肖敬修. 我国河道砂体储层沉积特征和非均质模式. 见:中国石油学会石油地质委员会编,碎屑岩沉积相研究. 北京:石油工业出版社,1988,216~244
- 3 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):317~324
- 4 楼章华、赵霞飞. 吉木萨尔凹陷仓房沟群火山砂岩的典型成岩反应及其物性特征. 石油与天然气地质,1992,13(2):167~174
- 5 Sullivan K B and McBride E F. Diagenesis of sandstones at shale contacts and diagenetic heterogeneity, Frio Formation, Texas. AAPG Bulletin, 1991, 75(1):121-138

# Diagenesis of the coal-rich fluvial sediments and reservoirs in the Xishanyao Formation, Turpan depression, Xinjiang

Liu Linyu   Liu Yiqun   Li Wenhou  
*Department of Geology, Northwest China University*

## ABSTRACT

A series of coal-bearing continental strata was laid down within the Xishanyao Formation, Turpan depression, Xinjiang. These strata are interpreted in this paper as the meandering river deposits in accordance with well logs, which in turn may be subdivided into channel bar and backswamp deposits. The coal seams commonly occur in the backswamp environment. The meandering channel sandbodies appear as the substantial reservoir sandstones. For instance, the channel sandstone complexes occupy the meander belts in the southeastern part of the depression, where the reservoir sandstones are well developed. The reservoir sandstones consist mostly of lithic sandstones and feldspathic litharenite with lower mineral maturity. The channel sandstone complexes are dominated by feldspathic litharenite in the southeastern part of the depression, where the dissolution is believed to be the typical diagenesis resulting in the formation of pore spaces with solution pores of sandstones. The channel sandstones comprise the bulk of lithic sandstones in the northern part of the depression, where compaction is considered as the typical diagenesis giving rise to the poor physical properties of the reservoir sandstones. The diagenesis of the reservoirs in the Xishanyao Formation are mainly manifested in compaction, cementation and dissolution.

**Key words:** meandering river, sandstone complex, reservoir, diagenesis