

# 鄂尔多斯盆地奥陶系 颗粒滩白云岩储层特征及主控因素

吴东旭<sup>1,2</sup>, 吴兴宇<sup>1,2</sup>, 王少依<sup>1,2</sup>, 于洲<sup>1,2</sup>, 丁振纯<sup>1</sup>, 孙云川<sup>3</sup>, 杨越东<sup>3</sup>

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

(3 中国石油大学(北京))

**摘要** 基于岩心观察、薄片鉴定、物性分析和地球化学分析,结合岩相古地理研究,认为鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下发育三套颗粒滩白云岩储层,分别为下奥陶统马家沟组马二段、马四段和马五<sub>7,9</sub>亚段。马二段颗粒滩环台内洼地分布,马四段和马五<sub>7,9</sub>亚段颗粒滩环台内洼地以及滩间次级洼地两侧的相对隆起带分布。白云岩储集空间类型主要为粒间孔、晶间(溶)孔、溶蚀孔洞和裂缝。三维CT分析表明,白云岩储层具有优良的储渗性能。颗粒滩白云岩主要为浅埋藏蒸发海水渗透回流交代成因。白云岩储层的发育主要受控于三个因素:层序格架控制的颗粒滩分布,表生岩溶作用,构造裂缝系统。

**关键词** 鄂尔多斯盆地;颗粒滩;白云岩储层;储层成因;岩溶;裂缝

**中图分类号**: TE121.2

**文献标识码**: A

## 1 概况

近年来,鄂尔多斯盆地在下古生界奥陶系盐下钻探,取得巨大进展,相继在下奥陶统马家沟组颗粒滩型白云岩储层段(图1)发现了桃38井、统74井等高产井,试气日产量达十几万至上百万立方米,但在马四段白云岩层段钻探的统51井、统52井试气日产量只有几百至几千立方米的低产气流。这一方面充分说明马家沟组中下组合存在储集性能良好的颗粒滩白云岩储层,另一方面也说明储层的类型、成因和分布规律不清依然是制约勘探区带和目标优选的瓶颈之一。

国内针对海相碳酸盐岩颗粒滩的研究取得了大量成果。谭秀成等<sup>[1]</sup>对四川盆地中三叠统雷口坡组碳酸盐台地巨型浅滩化进行了研究,周进高等<sup>[2]</sup>、胡安平等<sup>[3]</sup>针对四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩发育规律及白云岩储层成因和分布进行了研究,赵文智等<sup>[4]</sup>以塔里木盆地和四川盆地为例对礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义进行了研究和阐述。具体到鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩颗粒滩储层,杨

华等<sup>[5]</sup>认为古隆起周缘白云岩形成于水动力较强的浅水颗粒滩沉积;陈洪德等<sup>[6]</sup>认为沉积微相和成岩作用控制了古隆起东侧非岩溶型白云岩的形成;姚泾利等<sup>[7]</sup>认为马家沟组旋回性沉积为盐下储层叠合发育奠定了基础,而晶间孔型白云岩是盐下气藏的主要储层;黄正良等<sup>[8]</sup>对盆地中东部奥陶系白云岩储层进行了研究,认为沉积层序控制了储层类型的纵向旋回性分布,沉积层序内部的沉积相决定了储层的平面分布。总体而言,比较共同的认识是,鄂尔多斯盆地奥陶系盐下白云岩储层发育,沉积微相起着决定性的控制作用,颗粒滩微相是白云岩储层发育的基础。

结合前人的研究工作,笔者对鄂尔多斯盆地内近几年新探井的岩心、薄片进行了观察,并结合配套的地球化学分析,运用沉积相、层序地层学方法对盆地中东部奥陶系盐下颗粒滩白云岩储层进行了细致描述和成因分析,刻画了盐下三套颗粒滩的平面分布,总结了颗粒滩白云岩储层发育的主要控制因素,以期为盆地盐下的勘探工作提供依据。

收稿日期: 2016-07-27; 改回日期: 2017-02-03

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号:2016ZX05004-002)和中国石油集团科技重大专项“深层油气勘探开发关键技术研究”(编号:2014E-32-02)联合资助

吴东旭: 1984年生,硕士,工程师,主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号 中国石油杭州地质研究院; E-mail: wudx\_hz@petrochina.com.cn

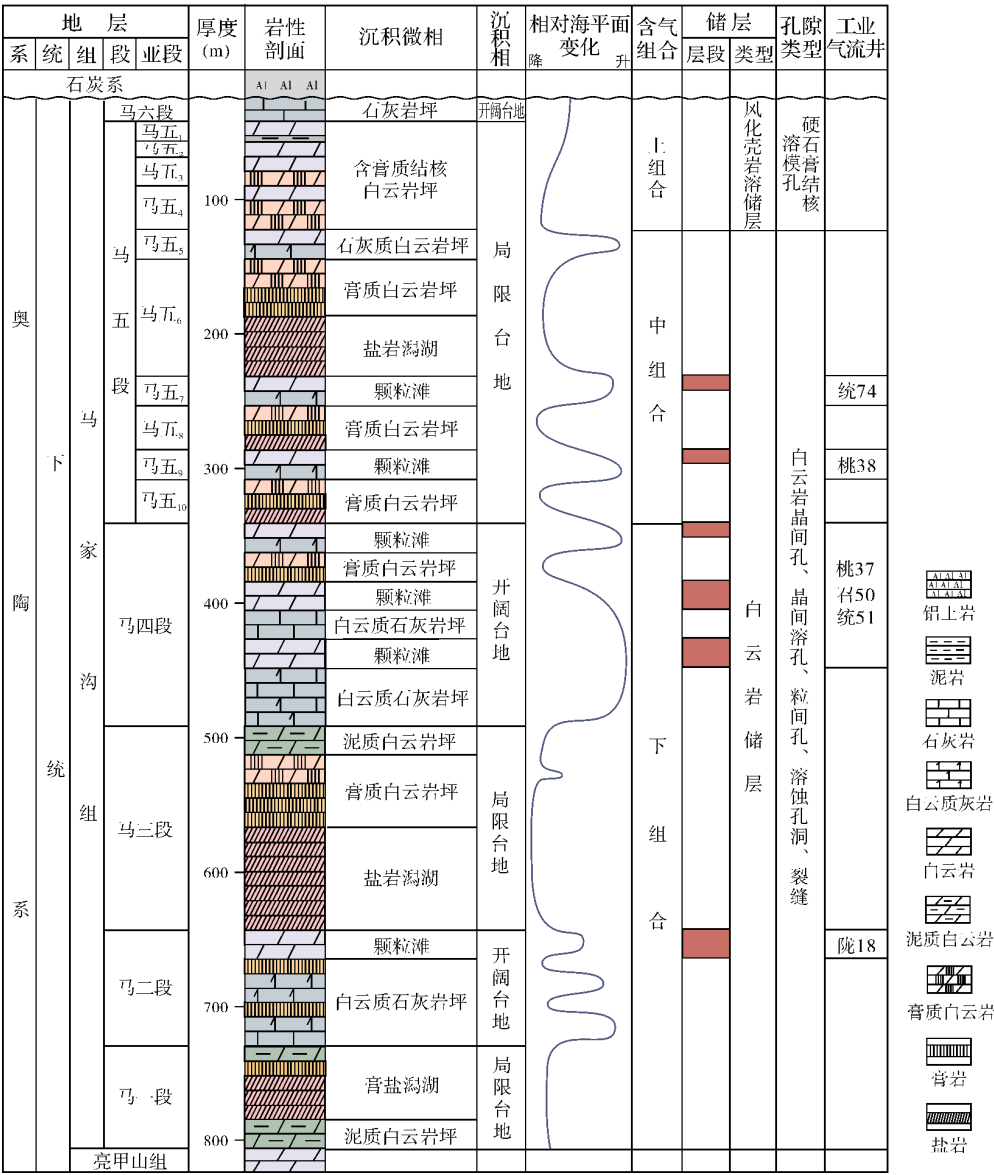


图1 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积储层综合柱状图

2 颗粒滩储层发育的地质背景

鄂尔多斯盆地马家沟组从下到上可以分为马一段~马六段6个段(图1),厚度可达500~800 m。其中:马一段、马三段和马五段为相对海退期,以碳酸盐岩蒸发台地相为主,发育了三大套膏盐岩沉积;马二段、马四段和马六段为相对海侵期,主要为碳酸盐岩开阔台地相和局限台地相,以白云岩和石灰岩沉积为主。马五段根据相对海平面升降,从上到下又可以分为马五<sub>1</sub>~马五<sub>10</sub>等10个亚段,其中马五<sub>6</sub>亚段为马五段主要的膏盐岩发育期。马三段和马五<sub>6</sub>亚段这两

大套膏盐岩沉积之下,发育了三套颗粒滩白云岩储层,分别为马二段、马四段和马五<sub>7,9</sub>亚段(图1)。

马二段、马四段分别发育于马家沟期的海侵期,马五<sub>9</sub>亚段和马五<sub>7</sub>亚段分别发育于马五亚期的相对海侵期,它们具有相似的沉积环境,沉积相类型基本为碳酸盐岩台地相<sup>[9]</sup>。

前人多认为,台内颗粒滩围绕台内石灰岩洼地呈半环形分布<sup>[10]</sup>。笔者经过对以往资料的梳理,结合近年来新的钻井、测井资料,发现不同层位的颗粒滩在平面展布上有不同的格局(图2),垂向上也具有丰富的演化特征。

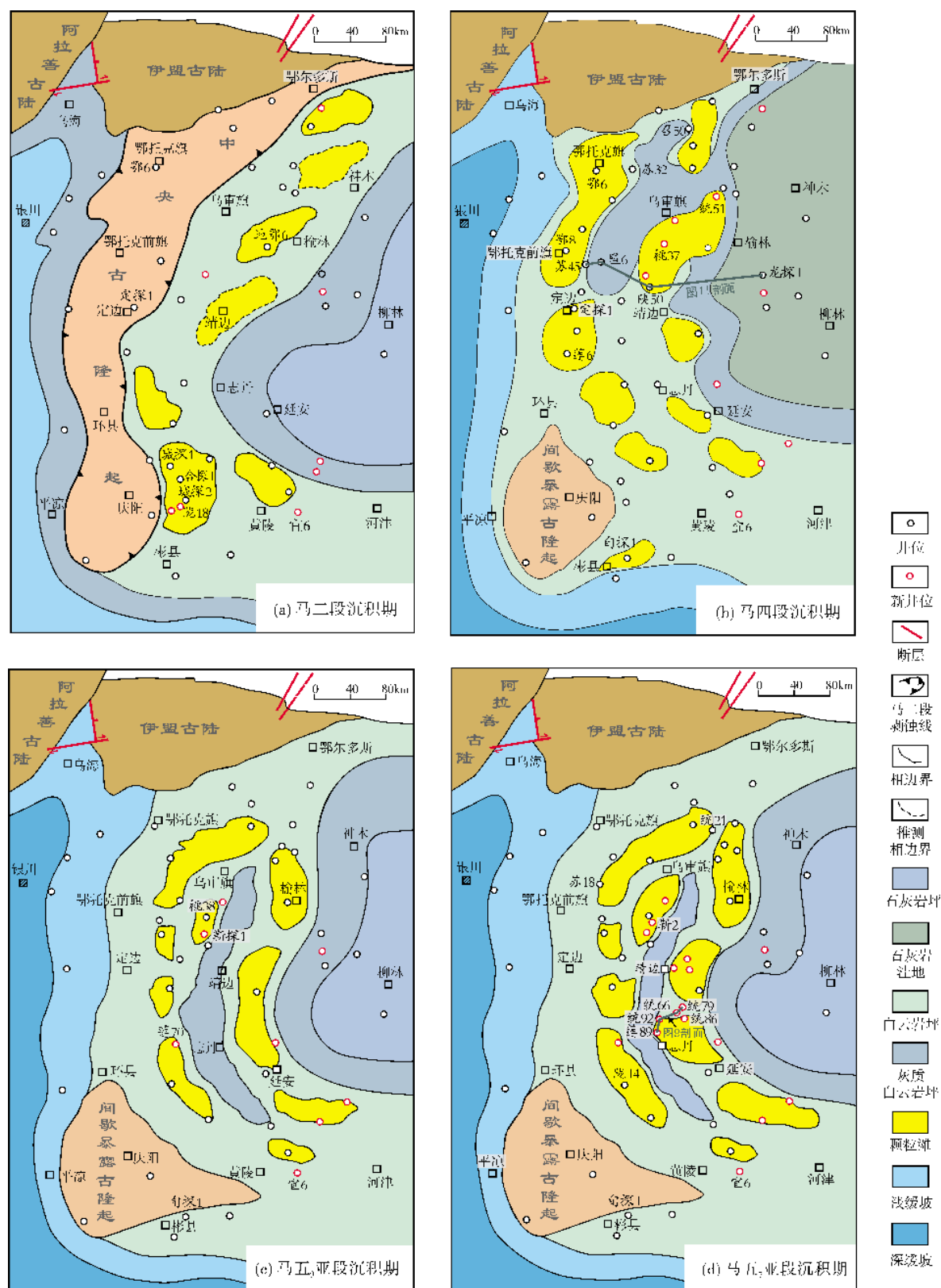


图2 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组颗粒滩储层岩相古地理背景

马二段为马家沟期首次海侵的沉积。该沉积期古地貌为一东部地势相对较低、周缘地势相对较高的单一缓坡型开阔台地,发育以海侵为主的震荡型海侵-海退沉积组合。在研究区东部柳林—延安地区发育石灰岩坪(图2a),岩性以泥晶灰岩为主;向西过渡到神木—志丹—延安地区发育灰质白云岩坪,岩性以灰质白云岩为主,夹白云岩薄层;再向西至中央古隆起一线发育白云岩坪沉积,岩性以白云岩为主,局部地区水动力较强,发育滩相沉积,岩性以颗粒白云岩为主,含少量隐见颗粒结构的粉晶白云岩。马二段颗粒滩单层厚度2~6 m,累积厚度可达4~22 m,平面展布面积合计可达 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

马四段发育于马家沟期的最大海侵期,属于开阔台地相(图1),沉积厚度较大。由于贺兰海槽的进一步发育,盆地西部祁连海域沉积水体逐渐加深,中东部开始由前期的缓坡型台地向隆洼相间型台地转换,除中央古隆起—靖西台坪带为继承性高部位外,在靖边东部也形成了一个次级隆起带。在盆地中东部的两个相对隆起带高部位水体较浅,水动力较强,广泛发育颗粒滩微相(图2b),颗粒滩沿古地貌高呈断续条带状分布,岩性以砂屑白云岩和粉—细晶白云岩为主,含少量鲕粒白云岩。这两条颗粒滩发育带是白云岩储层发育的主要区域。盆地中部乌审旗地区处于相对低洼地带,水体较深,发育灰质白云岩坪,岩性以灰质白云岩为主,局部含泥晶灰岩;靖边东部隆起带以东水体逐渐加深,向东依次发育灰质白云岩坪和石灰岩洼地沉积微相。马四段颗粒滩单层厚度为2~10 m,累积厚度可达5~40 m,平面展布面积合计达 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

马五<sub>1</sub>亚段和马五<sub>2</sub>亚段是整个马五亚期海退基础上的两次短周期海侵沉积,为典型的局限台地沉积(图1)。其沉积微相平面分布基本继承了马四段的格局,具有隆洼相间的沉积特征(图2c,2d)。在神木—延安一线以东依次发育灰质白云岩坪和石灰岩坪,岩性分别以灰质白云岩和泥晶灰岩为主;该线以西至鄂托克旗—鄂托克前旗一线发育白云岩坪,在靖边—志丹一线的灰质白云岩坪两侧,颗粒滩仍然呈两个断续条带分布,岩性为砂屑白云岩、颗粒白云岩,颗粒滩是这两个亚段主要的白云岩储层发育微相。马五<sub>2</sub>亚段单层厚度为2~5 m,累积厚度可达5~9 m,平面展布面积合计可达 $2.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

总体上,随着加里东运动对古地形的影响,马

家沟组合地内部的颗粒滩分布格局发生了一定变化;马二段沉积期为单纯的环台内洼地分布;马四段和马五段中组合沉积期,滩间的次级洼地发育,颗粒滩环台内洼地以及滩间洼地两侧的相对隆起带分布。

### 3 颗粒滩白云岩储层特征

基于岩心观察、薄片观察、测井分析、孔渗分析以及相关的实验数据等综合研究,对前述三套颗粒滩白云岩储层进行如下的详细表征。

#### 3.1 储集空间特征

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组颗粒滩白云岩储层的储集空间主要发育孔隙、孔洞、裂缝三大类(图3),孔隙主要包括晶间孔、粒间孔以及晶间(粒间)溶孔等,孔洞包括溶孔和溶洞,裂缝以构造缝和溶蚀缝为主。从有效储层的发育规模来看,储集空间以白云石晶间孔、粒间孔及晶间(粒间)溶孔为主,其次为溶蚀孔洞,裂缝对储层性能也有一定的沟通和改善作用。

晶间孔(图3a—3d) 主要分布于粗粉晶—细晶白云石的晶间,局部自形度较高的粉晶白云石晶间也可发育,自形晶之间的晶间孔边界平直,孔隙外观常呈现为一个不规则的多边形,孔径一般几十到上百微米。在后期漫长的成岩作用过程中,晶间孔易于受到表生岩溶、埋藏溶蚀等作用的影响,往往发育晶间溶孔并且与晶间孔伴生(图3e)。

粒间孔(图3f) 主要发育于砂屑、鲕粒、生物碎屑等碳酸盐岩颗粒间,属于结构选择性孔隙。颗粒结构一般抗压性较好,在成岩过程中保存了一部分原生的粒间孔隙,在此基础上经过后期的溶蚀改造,可形成储集性能较好的粒间溶孔。

溶蚀孔洞(图3e,3g,3h) 是盐下白云岩储层的主要储集空间之一,其储集性能主要受表生岩溶作用、方解石胶结作用、机械充填作用和埋藏溶蚀作用的共同控制,由于受到的成岩作用类型与程度有所差异,溶蚀孔与溶洞在宏观与微观上也表现出了不同的特征。部分溶蚀孔、洞被后期的淡水白云石、方解石、铁白云石、石英与黄铁矿等胶结物所充填而缩小了储集空间(图3g),少部分主要受溶蚀作用所控制的溶孔、溶洞能够比较完整地保存下来(图3e,3g),成为有效的储集空间。



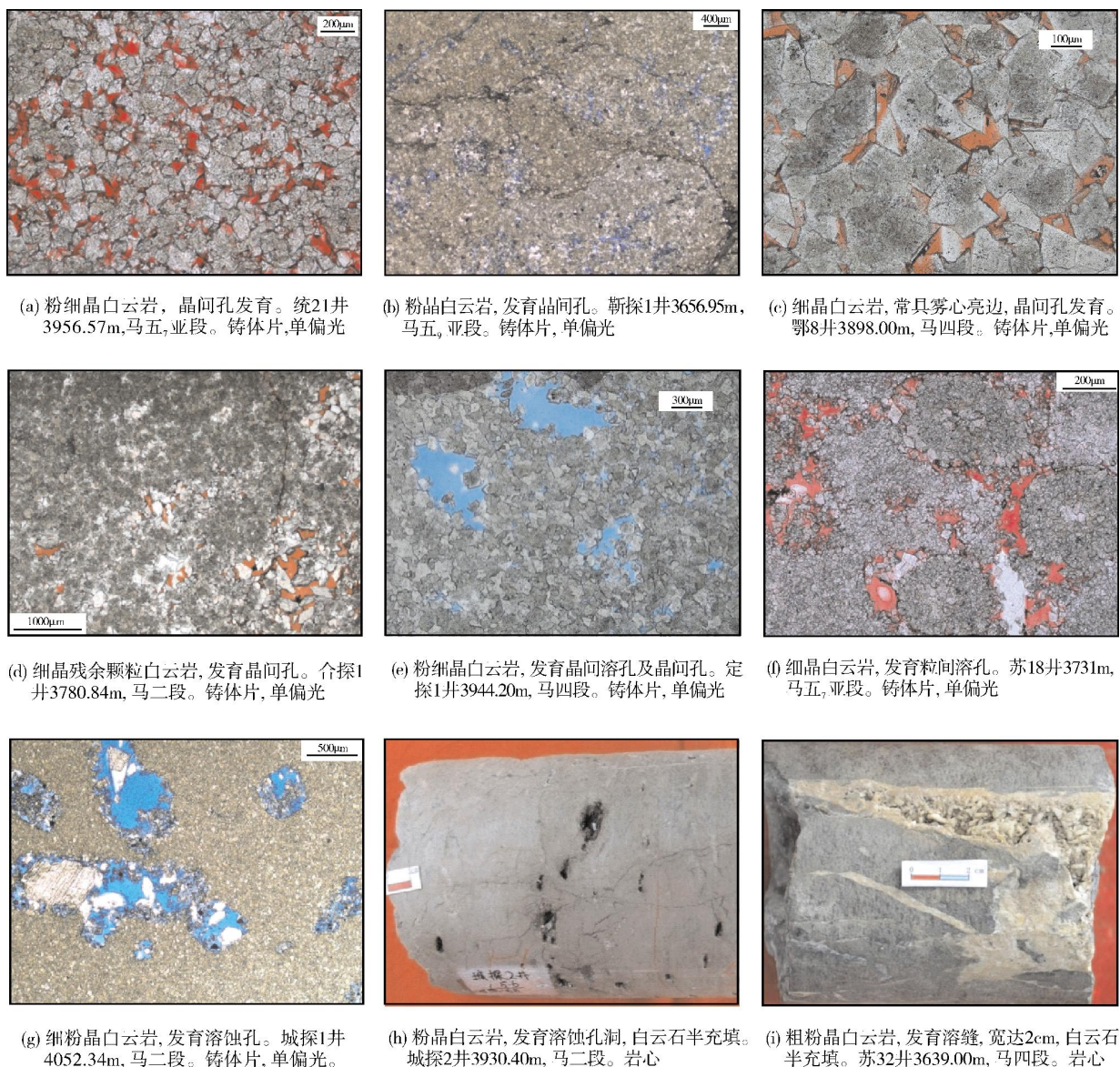


图3 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组颗粒滩储层典型特征

样品采集井的位置见图2

裂缝系统对于非均质性较强的碳酸盐岩储集体十分重要, 裂缝既是表生期大气淡水的有利通道, 也是埋藏期有机酸性水的重要输导网络。裂缝不仅有利于增加储层的孔渗性能, 它也是后期油气运移的重要通道<sup>[11]</sup>。研究区盐下白云岩储层先后在加里东末期与燕山期末经历了多次抬升和沉降, 在地层抬升和沉降的过程中, 地应力发生变化, 导致局部区域岩石破裂, 产生构造裂缝; 同时在后期的成岩作用下, 储层中也会产生溶蚀缝。与孔隙相比, 裂缝相对平直且开启程度高, 孔渗特征较好, 易于被流体中沉淀出的方解石

与白云石所胶结或充填, 部分裂缝在叠加了后期埋藏溶蚀作用下也可构成有效的储集空间(图3i)。

### 3.2 储层物性特征

颗粒滩储层的孔隙度与渗透率具有较好的相关性(图4), 除马二段因数据点较少外, 马四段和中组合(马五<sub>5-10</sub>亚段)中高于标准下限(孔隙度 $\geq 2.5\%$ , 渗透率 $\geq 0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )的储层都呈现较好的孔渗相关性。个别高孔低渗样点可能是受溶蚀孔洞的影响, 少数低孔高渗样点可能是受到裂缝的影响。

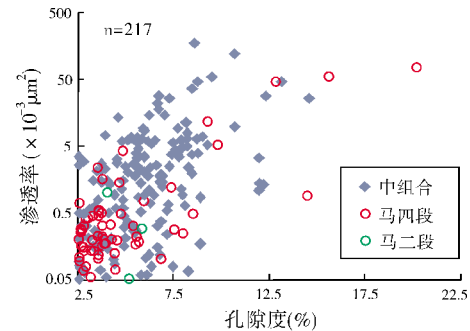


图4 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组颗粒滩白云岩储层岩心物性分析

通过对靳2井(井位见图2d)中组合马五<sub>2</sub>亚段颗粒滩白云岩和陇14井(井位见图2d)中组合马五<sub>2</sub>亚段白云岩坪粉晶白云岩的柱塞样进行三维CT扫描

(分辨率 8μm),经定量提取数据体分析(图5),对比十分明显。

靳2井样品为颗粒滩粉细晶白云岩,总孔隙度为7.32%。其中:连通孔隙体积占比为73%;最大孔隙半径为103.5 μm,平均18.83 μm;最大喉道半径74.44 μm,平均13.06 μm。典型颗粒滩白云岩储层平均孔喉半径均大于10 μm,属于储渗性能俱佳的孔隙结构类型。

陇14井样品为白云岩坪粉晶白云岩,总孔隙度为3.15%。其中:连通孔隙体积占比为69%;最大孔隙半径为29.89 μm,平均4.07 μm;最大喉道半径27.32 μm,平均3.01 μm。白云岩坪白云岩储层平均孔喉半径均小于5 μm,其储渗性能明显差于颗粒滩型白云岩储层,属于低孔低渗型储层。

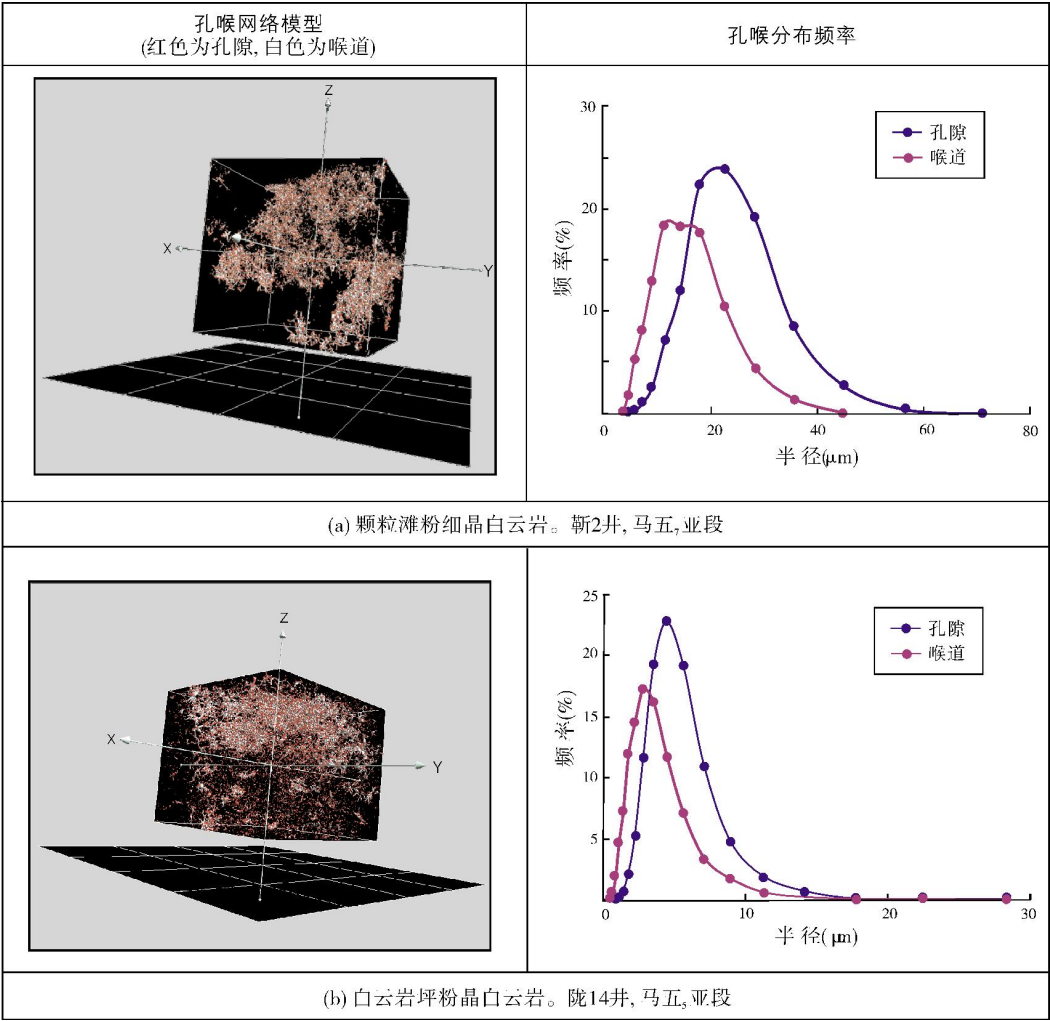


图5 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组颗粒滩和白云岩坪储层三维CT扫描孔喉分布特征对比



### 3.3 白云岩地球化学特征

颗粒滩白云岩一般为粉晶—粗粉晶白云岩和粉细晶白云岩,局部存在细晶白云岩。细晶白云岩经常可以见到明显的雾心亮边结构(图3c,3e),说明应该是后期交代的产物。白云岩坪白云岩主要为泥粉晶—粉晶白云岩,含有大量的石膏、石盐以及硬石膏结核等蒸发岩类矿物,说明其形成环境主要为强蒸发的萨布哈环境<sup>[12]</sup>。

在不同的成岩环境中,白云石化作用和白云石生成的流体具有不同的成分与特性,必然或多或少地留下其地球化学烙印,利用C、O、Sr同位素分析,能较好地反映成岩流体的特性<sup>[13-14]</sup>。白云石的碳氧稳定同位素组成与引起白云石化的流体介质有关,并主要受到介质盐度和温度的影响。海水蒸发作用使海水的碳氧同位素向偏正方向迁移,所以同生白云岩中的碳氧同位素值比海水和海水胶结物的碳氧同位素更偏正。相反,埋藏条件下地下卤水是海水、地层水、包括有淡水和海水混入的地下流体,再加上高温,会使氧同位素向偏负的方向迁移。

根据 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 交会图(图6)可知:首先,与同期正常盐度海水(马五<sub>7-9</sub>亚段石灰岩所反映的)相比,白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏正,说明其受到蒸发作用的影响。其中,马五<sub>6,8,10</sub>亚段以白云岩坪白云岩为主,白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值位于强蒸发海水的范围内,部分受到大气淡水的影响而偏负;马五<sub>7,9</sub>亚段以颗粒滩白云岩为主,白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值处于正常海水和强烈蒸发海水之间,属于渗透回流海水的范围。由此可见,颗粒滩白云岩形成于浅埋藏的低温环境,主要由蒸发海水的渗透回流交代而成。

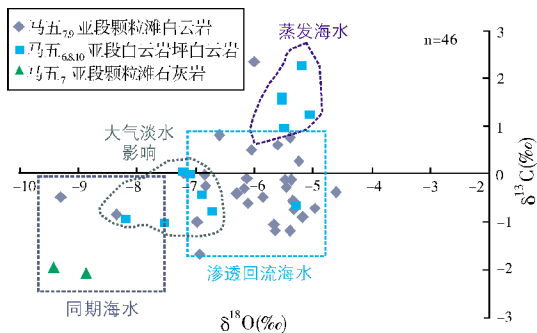


图6 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合颗粒滩白云岩与白云岩坪白云岩碳氧同位素特征对比

根据 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 特征(图7)可知,大部分岩心样品数据点落在同期海水的范围内,部分数据点高于同期海水应该是受到了大气淡水的影响,局部高值则有可能受到壳源Sr的影响。

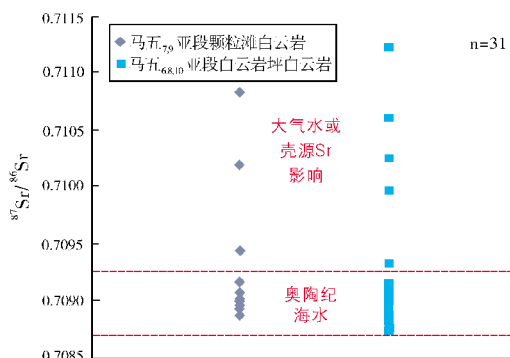


图7 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合颗粒滩白云岩与白云岩坪白云岩Sr同位素特征对比

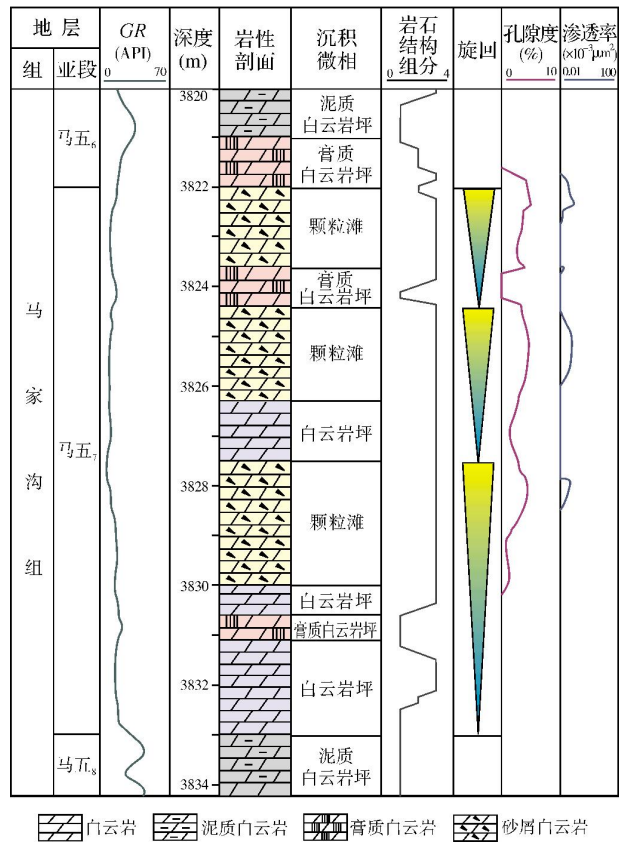
## 4 颗粒滩储层发育主控因素

颗粒滩白云岩储层的发育主要受控于沉积、成岩和构造三方面的因素:准同生期层序格架控制的颗粒滩分布,表生期的岩溶作用及后期的构造裂缝作用。

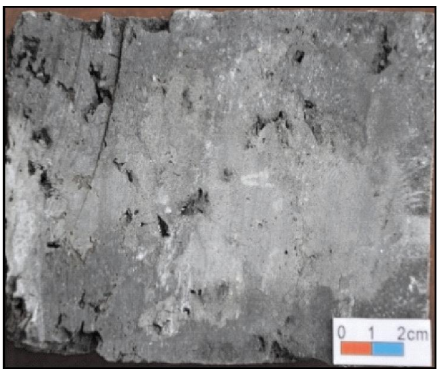
### 4.1 层序格架控制的颗粒滩分布

马二段、马四段以及马五<sub>7,9</sub>亚段均发育于相对海侵期,随水体加深,水体能量增加,波浪作用强烈,在地形高部位易于形成颗粒滩沉积<sup>[14]</sup>。沉积物初始孔隙相对较好,准同生期及晚期埋藏后,白云石化作用使之容易形成晶间孔和晶间溶孔,再叠加表生期大气淡水溶蚀作用及埋藏溶蚀作用,从而能形成优质储层。

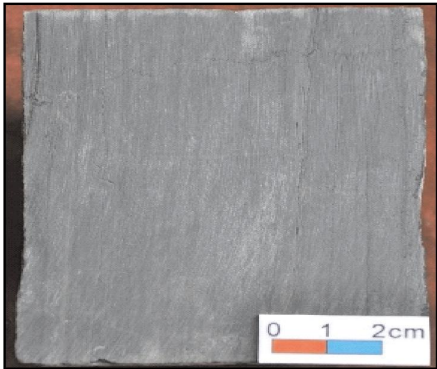
受加里东运动影响,马二段在靠近中央古隆起的台地边缘发育了一系列北东向的滩体,马四段和中组合的马五<sub>7,9</sub>亚段在中央古隆起和靖边东部次级隆起发育了大量颗粒滩沉积。在对研究区内5口井岩心的详细观察描述基础上,结合测井曲线、岩性解释以及岩石结构组分解释,笔者认为颗粒滩主要发育于海侵期向上变浅旋回的中上部。统86井(位置见图2d)马五<sub>7</sub>亚段发育于相对海平面上升期,本身为一个三级层序。根据岩性和测井曲线描述,马五<sub>7</sub>亚段可以进一步细分为3个向上变浅的四级层序(图8,图9)。每一个四级层序的下部为白云岩坪或膏质白云岩坪沉积,岩性以深灰色泥粉晶白云岩或灰白色膏质白云岩为主,岩性致密;上部为颗粒滩沉积,岩性以褐灰色粉细晶白云岩为主,发育大量的溶蚀孔洞和基质孔隙。



(a) 统86井岩心综合柱状图



(b) 颗粒滩。褐灰色粉细晶白云岩, 发育溶蚀孔洞, 石盐半充填。统86井3828.10m, 马五<sub>7</sub>亚段。岩心



(c) 白云岩坪。灰色泥粉晶白云岩, 岩性致密。统86井3832.20m, 马五<sub>8</sub>亚段。岩心

图8 鄂尔多斯盆地奥陶系层序格架控制的颗粒滩发育模式

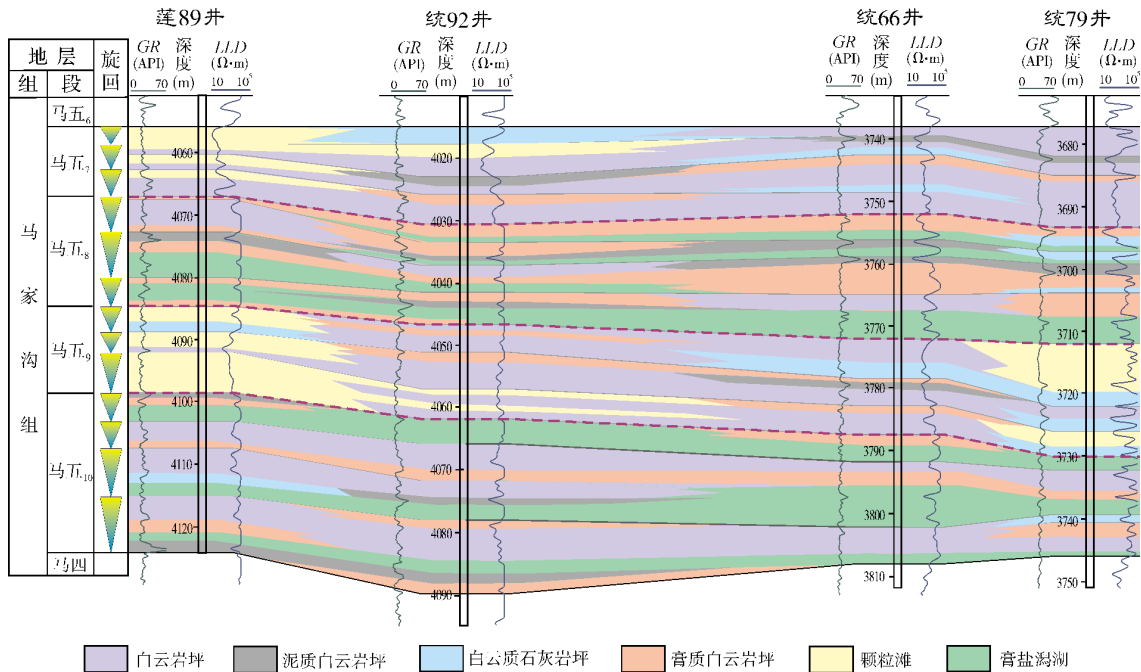


图9 鄂尔多斯盆地奥陶系层序格架控制的颗粒滩发育剖面图(剖面位置见图2d)



一般认为,海侵期水体能量较强,有利于颗粒滩的发育,但初始海侵期水体较深,颗粒滩只发育于古地形较高部位,而到了向上变浅层序的中上部,水体虽然相对较浅,但还保有足够的能量,这使得颗粒滩的发育较为广泛。在大多数钻井剖面上观察到,马五<sub>7</sub>和马五<sub>9</sub>亚段向上变浅层序的中上部,滩体较发育(图9),少数在初始海侵期也可以发育颗粒滩沉积,说明其有可能处于沉积期地形较高部位。

颗粒滩是同沉积期形成储层的最有利的沉积微相。平面上,颗粒滩的发育受沉积期古地形的控制;纵向上,颗粒滩的发育主要与相对海平面的升降有

关,在层序地层格架内可以有效预测滩体的纵向分布。结合瓦尔特相律,可以进一步预测滩体的侧向迁移和展布(图9)。

## 4.2 表生岩溶作用

构造抬升和地层经历长期的晚表生岩溶作用是碳酸盐岩储层发育的关键<sup>[15]</sup>。盆地内中央古隆起东西两侧,奥陶系碳酸盐岩地层被剥至下奥陶统马家沟组马五段,地形起伏大,与上覆石炭系呈角度不整合接触(图1,图10),代表了超过130 Ma的地层缺失。自晚寒武世开始,直至石炭纪,鄂尔多斯盆地一直处

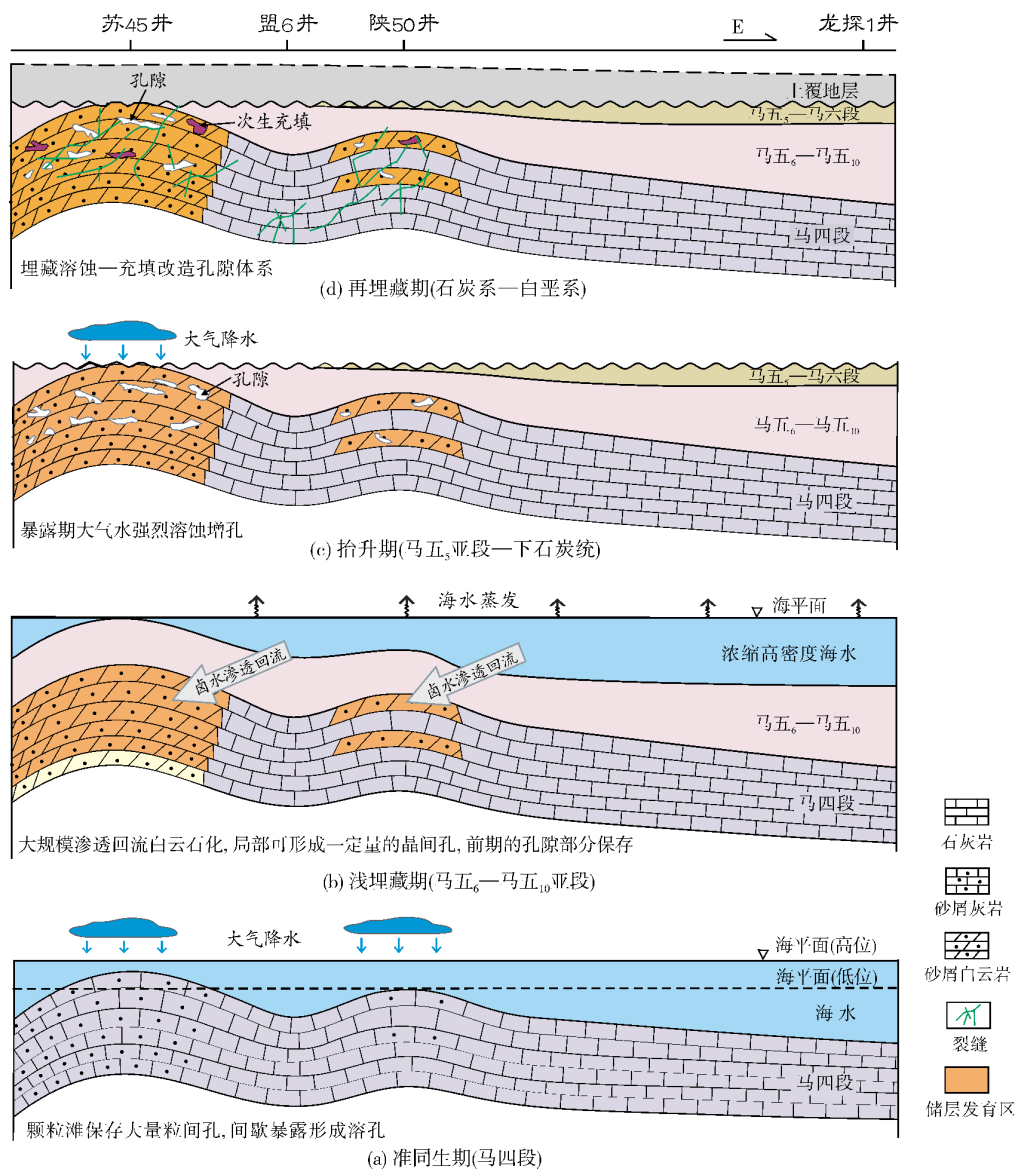


图10 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段颗粒滩白云岩储层发育模式  
剖面位置见图2b

于赤道附近半干旱—半潮湿的炎热气候条件,有利于古风化壳岩溶储层的发育。此外,中央古隆起东侧的中下组合地层,虽然没有受到表生岩溶的直接作用,但经由剥蚀窗口区,大气淡水可顺层发生岩溶作用,同样可以形成广泛的顺层岩溶型储层。

受岩溶地貌控制的水文条件决定了古风化壳岩溶储层发育的强弱。鄂尔多斯盆地奥陶系马二段—马五段中组合的勘探实践表明,垂直渗流带以垂直溶缝、小溶洞的发育为主,古隆起及其附近直接暴露的马二段—马五段中组合地层,受淋滤溶蚀作用形成了大量白云石晶间溶孔或溶蚀孔洞(图11),水平潜流带的溶孔、溶洞和溶缝也较发育,但充填相对严重,深部缓流带溶孔、溶洞和溶缝偶尔发育。平面上,岩溶斜坡的溶孔、溶洞和溶缝最发育,其次是岩溶高地,岩溶盆地发育的溶孔、溶洞和溶缝皆被完全充填(图11)。

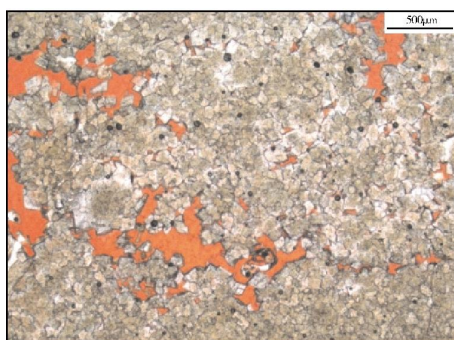
### 4.3 构造裂缝系统

裂缝在碳酸盐岩储集层形成中具有重要地位。由于碳酸盐岩中溶蚀孔洞发育的非均质性和连通性差,即使是孔洞型碳酸盐岩储集体,要形成具经济价值的

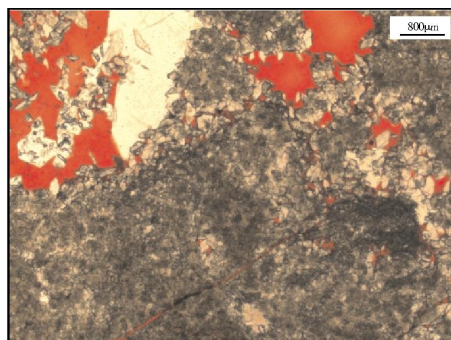
油气藏亦离不开裂缝的沟通作用,裂缝既是油气聚集的重要场所,又是油气进入储集体的必要条件。

断层、裂缝为岩溶作用提供了地表水和地下水的渗透和运移空间。在断层、裂缝发育的地方,特别是张性断裂发育的部位,岩层结构松散,孔隙大,有利于岩溶作用的增强,沿这些断裂常发育岩溶溶洞、洞穴。同时,储层内部的微裂缝和微缝合线等对孔隙的连通作用明显,并且这些微缝经过溶蚀改造后可以形成良好的储渗体系和渗流网络。

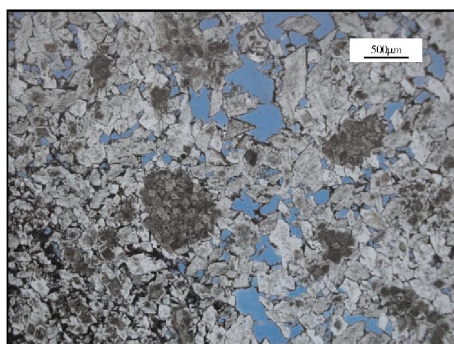
朱国华<sup>[16]</sup>在对鄂尔多斯盆地碎屑岩储集层深入研究的基础上,提出碎屑岩孔隙充填沉淀的差异沉积原理,即油气进入孔洞则自动地阻止或减缓成岩作用的进行。这一原理同样适用于碳酸盐岩构造裂缝的充填和保存,即只有与油气生成高峰阶段相匹配的构造裂缝,由于油气进入才成为有效储渗裂缝,否则,裂缝可能在同构造运动期为成岩矿物所充填。李国蓉<sup>[17]</sup>对鄂尔多斯盆地马家沟组中的裂缝进行研究,将裂缝分为七期,其中燕山构造运动与油气生成高峰期匹配,该期裂缝成为天然气运移的通道和重要聚集场所。



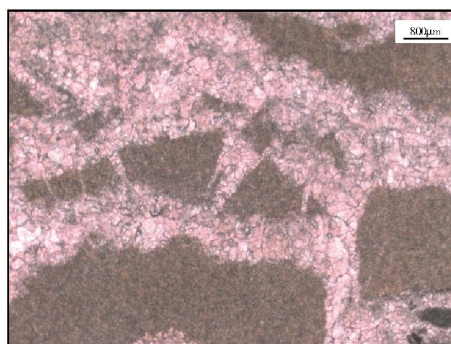
(a) 细晶白云岩, 溶孔发育。莲6井4301.40m, 马四段



(b) 粗晶白云岩, 发育溶蚀孔和微裂缝。合探1井3780.84m, 马二段



(c) 细晶白云岩, 晶间孔和溶蚀孔发育。鄂6井3851.20m, 马四段



(d) 细晶白云岩, 方解石充填溶孔、溶缝。宜6井2435.60m, 马五段

图11 鄂尔多斯盆地奥陶系受表生岩溶影响的白云岩储层薄片特征  
样品采集井的位置见图2

#### 4.4 储层发育模式

勘探及研究证实,鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧奥陶系马四段—马五段中组合储层多呈层状分布。通过对盆地内典型储层演化剖面(图10,以马四段为例)分析,马四段—马五段中组合主要的输导体系由颗粒滩渗透性孔隙层和后期裂缝组成。

奥陶纪马四段沉积期,台地边缘及台内沉积了一系列的颗粒滩,保存了一定量的粒间孔隙(图10)。随着地层埋深加大,由于渗透回流作用或埋藏成岩,颗粒滩发生白云石化(图10),其原始孔隙的保存以及次生孔隙的发育都明显强于白云岩坪的白云岩和洼地的泥晶灰岩,最终形成了良好的渗透性孔隙层。经过加里东构造运动,在中央古隆起及其东部地区,地层广泛发育裂缝。孔隙与裂缝这两者相叠加,形成了颗粒滩白云岩横向和纵向上的网状输导体系(图10)。

### 5 结 论

(1)鄂尔多斯盆地中东部下奥陶统马家沟组盐下发育三套颗粒滩白云岩储层,分别为马二段、马四段和马五<sub>7,9</sub>亚段。白云岩储集空间类型主要为粒间孔、晶间(溶)孔、溶蚀孔洞和裂缝,其中马五<sub>7,9</sub>亚段储层优于马二段和马四段储层。

(2)基于岩心薄片观察和地球化学同位素分析,颗粒滩白云岩主要为浅埋藏蒸发海水渗透回流交代成因,属于低温白云岩。

(3)颗粒滩白云岩储层的发育主要受控于三方面因素:层序格架控制的颗粒滩纵横向分布、表生岩溶作用的改造、构造裂缝沟通孔隙所形成的网状输导体系。

#### 参 考 文 献

- [1] 谭秀成,李凌,刘宏,等. 四川盆地中三叠统雷口坡组碳酸盐台地巨型浅滩化研究[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(3): 457-471.
- [2] 周进高,房超,季汉成,等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩发育规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 27-36.
- [3] 胡安平,沈安江,潘立银,等. 四川盆地寒武系龙王庙组颗粒滩相白云岩储层成因和分布研究[G]//2015年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集. 2015.
- [4] 赵文智,沈安江,周进高,等. 礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 257-267.
- [5] 杨华,付金华,魏新善,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 733-740.
- [6] 陈洪德,胡思涵,陈安清,等. 鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧非岩溶白云岩储层成因[J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 1-7.
- [7] 姚泾利,包洪平,任军峰,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(3): 1-12.
- [8] 黄正良,武春英,马占荣,等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积层序及其对储层发育的控制作用[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(5): 20-29.
- [9] 史基安,邵毅,张顺存,等. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 316-324.
- [10] 侯方浩,方少仙,董兆雄,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 106-112.
- [11] 李龙滢,何千里,俞惠隆. 鄂尔多斯盆地马家沟组储气层的裂缝发育特征[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(1): 17-24.
- [12] 刘燕,付金华,李建明. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组白云岩成因机理分析[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(11): 46-50.
- [13] 艾伦 I R, 威金斯 W D. 白云岩储层——白云岩成因与分布地球化学分析技术[M]. 马锋,张光亚,李小地,等译. 北京:石油工业出版社, 2013.
- [14] 沈安江,郑剑锋,陈永权,等. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 1-10.
- [15] 赵文智,沈安江,胡安平,等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3495-3508.
- [16] 朱国华. 陕北延长统砂体成岩作用与油气富集的关系[J]. 石油勘探与开发, 1985, (6): 1-9.
- [17] 李国蓉. 从成岩角度看鄂尔多斯马家沟组碳酸盐岩中的裂缝及其储集意义[J]. 岩相古地理, 1997, 17(3): 46-53.

编辑:董庸

## Characteristics and Main Controlling Factors of Ordovician Grain Beach Dolomite Reservoir in Ordos Basin

Wu Dongxu, Wu Xingning, Wang Shaoyi, Yu Zhou,  
Ding Zhenchun, Sun Yunchuan, Yang Yuedong

**Abstract:** Based on the data from cores, thin-sections, porosity and permeability, and geochemistry, three sets of grain beach dolomite reservoirs were developed under the Ordovician gypsum salt in east-central Ordos Basin. They were the Lower Ordovician Majiagou Member-2, Member-4, and Submember-5<sub>7,9</sub>. According to the lithofacies palaeogeography, the grain beach usually distributed around the depression (Member-2) and the secondary depression (Submember-5<sub>7,9</sub>) in the platform, especially on the relative uplift belts. The types of dolomite reservoirs are mainly intergranular pores, intercrystalline pores, intercrystalline dissolution pores, dissolution pores and caves, and fractures. 3-D computed tomography shows that the dolomite reservoir has excellent porosity and permeability. The genesis of the grain beach dolomite is mainly the osmotic reflux of evaporative seawater in shallow burial diagenetic environment. The development of the dolomite reservoir is mainly controlled by three factors: the distribution of the grain beach under the sequence framework, the karstification, and the fracture system.

**Key words:** Grain beach; Dolomite reservoir; Reservoir genesis; Karstification; Fracture; Ordos Basin

Wu Dongxu: MSc, Geological Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China