

# 鄂尔多斯盆地靖西地区马家沟组中组合储层特征及主控因素

于洲<sup>1</sup>, 孙六一<sup>2</sup>, 吴兴宇<sup>3</sup>, 吴东旭<sup>3</sup>, 姚学辉<sup>1</sup>, 丁振纯<sup>3</sup>  
(1 中国石油大学(北京); 2 中国石油长庆油田公司; 3 中国石油杭州地质研究院)

**摘要** 以靖西地区钻遇或钻穿中组合储层的钻井资料为基础,通过岩心观察、薄片鉴定、物性分析等手段,对该区奥陶系马家沟组中组合的白云岩储层特征及主控因素进行了研究。储集层岩性主要为粉晶白云岩、泥粉晶白云岩及泥晶白云岩等,它们在薄片资料统计中出现的频率分别为33%、21%、15%,属于白云岩型储层。储集空间以晶间孔和晶间溶孔为主,溶洞和溶缝次之,具有低孔、低渗特征,孔隙度以1%~3%居多,占45%,渗透率以 $(0.001\sim 0.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 最多,占74%。储层的形成明显受沉积相和成岩作用控制,白云岩坪和颗粒滩是储层发育的有利相带,白云石化作用和表生岩溶作用是储层孔隙发育的主要成因。

**关键词** 马家沟组; 储层特征; 控制因素; 成岩作用; 靖西地区; 鄂尔多斯盆地

**中图分类号**: TE112.23 **文献标识码**: A

## 1 地质与勘探概况

靖西地区位于鄂尔多斯盆地靖边气田西侧(图1),是目前的勘探热点地区。盆地纵向上有多个产气层系,奥陶系马家沟组五段(马五段)是重要的产气层之一<sup>[1]</sup>。盆地本部奥陶系马家沟组自上而下被分为上、中、下三个含气组合(图2):上组合为马五<sub>1</sub>—马五<sub>4</sub>,属于风化壳岩溶型储层,孔隙类型以溶模孔为主;中组合为马五<sub>5</sub>—马五<sub>10</sub>,属于白云岩型岩性储层,孔隙类型主要为晶间孔与晶间溶孔;下组合为马四段,也属于白云岩型岩性储层,孔隙类型主要为晶间孔与晶间溶孔<sup>[2]</sup>。

靖边气田自1998年发现以来,诸多学者的研究工作都集中在马五<sub>5</sub>亚段以上的上组合风化壳岩溶型储层,并且在盆地中部和苏里格地区古生界也均已发现了大型的天然气藏<sup>[3]</sup>。随着勘探开发的不断深入,近两年来长庆油田在相关研究成果的指导下对靖西地区中组合开展了钻探工作,并在苏203区块、苏322区块获得高产工业气流。苏203井在马五<sub>5</sub>

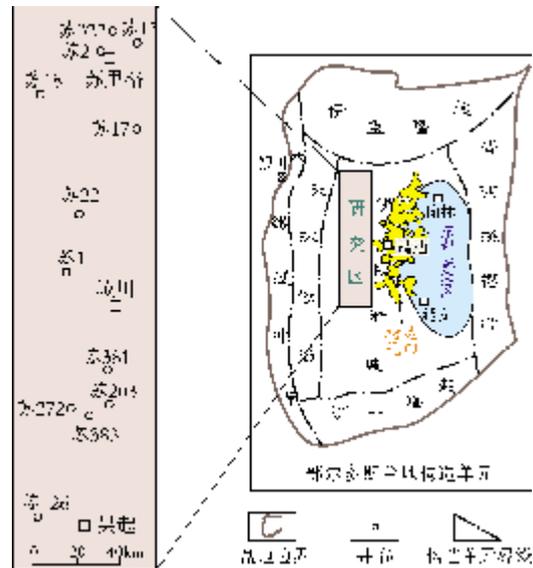


图1 靖西地区位置及井位分布示意图

亚段产气 $104.89\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ ,苏322井在马五<sub>5</sub>亚段产气 $41.59\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ ,显示出靖边气田西侧中组合白云岩型岩性油气藏有巨大的勘探潜力。但由于目前对盆

收稿日期: 2012-03-18; 改回日期: 2012-06-05

基金项目: 受国家“十二五”大型油气田及煤层气开发重大专项课题(2011ZX05004-002)资助

于洲: 1986年生,2008年本科毕业于长安大学地球科学与资源学院资源勘查工程专业;现为中国石油大学(北京)地球科学学院在读硕士研究生,从事沉积与储层地质研究。通信地址: 102249北京市昌平区中国石油大学地质楼906室;电话: (010)89733435



地马家沟组中组合的相关研究还不够完善,尤其对储集层成因机理及主控因素的认识还不够清楚,导致了共计75口井位部署在不含气和贫气区块,有且仅有7口井日产量大于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,风险勘探成本较高,勘探效益较低。

为此,本文选取靖西地区面积大约 $16\ 000 \text{ km}^2$ 的一个区块为研究工区(图1),以工区内钻遇或钻穿中组合储层的82口井第一手资料为基础,通过岩心观察、薄片鉴定、物性等实验分析,对中组合白云岩储层特征及主控因素进行了深入研究,以便于为该地区进一步的勘探决策提供科学依据。

## 2 马家沟组中组合储层特征

### 2.1 岩石学特征

研究区马家沟组中组合储层的钻井岩心和铸体薄片岩石学特征表明,该组合中的储层岩性以白云岩为主,按结构组分可分为泥晶白云岩、泥粉晶白云岩、粉晶白云岩、粉-细晶白云岩、细晶白云岩、颗粒白云岩等六类白云岩。根据薄片资料统计,这

六类白云岩的出现频率如图3所示,主要是粉晶白云岩(33%)和泥粉晶白云岩(21%),其次依序为泥晶白云岩(15%)、颗粒白云岩(13%)、粉-细晶白云岩(9%)和细晶白云岩(9%)。岩石的储集性能与白云岩晶体的大小、自形程度及接触关系密切相关。

该区中组合储层的孔隙多发育在泥粉晶白云岩、粉晶白云岩、粉-细晶白云岩(图4a)与细晶白云岩等四类白云岩中,且大部分发育在自形程度较好的晶体之间。泥晶白云岩一般比较致密(图4b),而颗粒白云岩粒间多被胶结充填,这两类白云岩基本不发育孔隙。

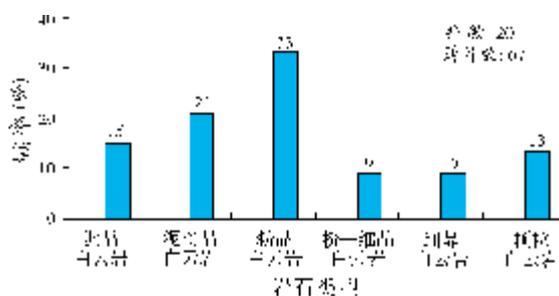
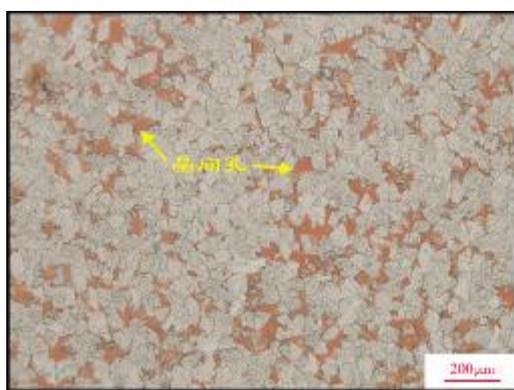


图3 靖西地区奥陶系马家沟组中组合岩石类型统计



(a) 粉-细晶白云岩。发育晶间孔。苏2井, 3597.02m, 马五亚段。铸体片, 单偏光



(b) 泥晶白云岩。岩性致密, 基本不发育孔隙。苏2井, 3592.08m, 马五亚段。铸体片, 单偏光

图4 靖西地区奥陶系马家沟组中组合白云岩孔隙发育特征

### 2.2 储集空间类型及特征

#### 2.2.1 晶间孔与晶间微孔

晶间孔是鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中组合白云岩储层的重要储集空间,它由白云石化作用和重结晶作用而形成,主要发育在泥粉晶白云岩、粉晶白云岩、粉-细晶白云岩与细晶白云岩等四类白云

岩中,且大多数存在于自形程度较高的白云石晶体之间,少量发育在白云石自形晶与他形晶之间。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(图5a);而晶间微孔仅少量出现,在泥粉晶白云岩的泥晶颗粒之间可见(图5b)。

#### 2.2.2 溶孔和溶洞

研究区马家沟组中组合白云岩储层发育少量的

溶孔和溶洞, 它们是由有机/无机的酸液溶蚀所形成的, 但由于所受后期成岩作用的改造程度不同, 溶孔或溶洞的储集性能差异较大。部分溶蚀孔隙被白云石渗流粉砂或巨晶白云石充填而失去了储

集能力(图6a), 部分溶孔或溶洞经过后期的方解石胶结(图6b)、白云石粉砂/石英充填或半充填(图6c)而降低了储集性能, 仅少部分溶孔未被充填而较完整地保存下来(图6d)。



(a) 粉-细晶白云岩。晶形呈自形与他形, 晶间孔发育。苏383井, 3956.57m, 马五亚段。铸体片, 单偏光

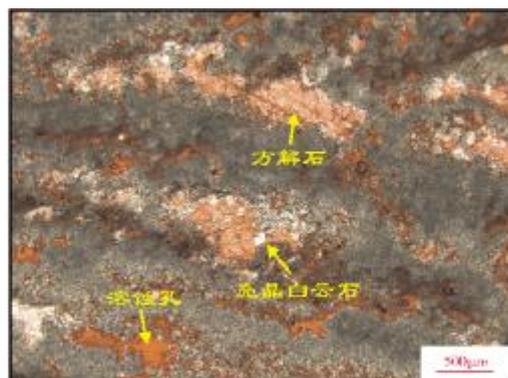


(b) 泥粉晶白云岩。粉晶间为泥晶白云石和晶间微孔。苏1井, 3712.83m, 马五亚段。铸体片, 单偏光

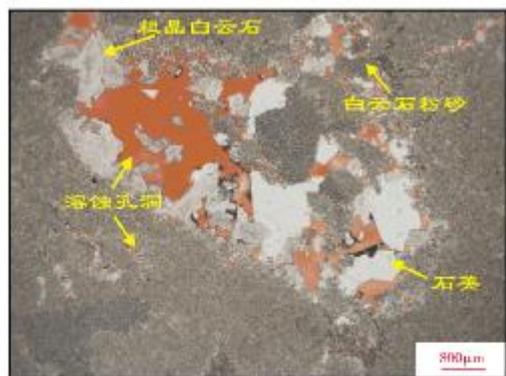
图5 靖西地区奥陶系马家沟组中组合孔隙发育类型



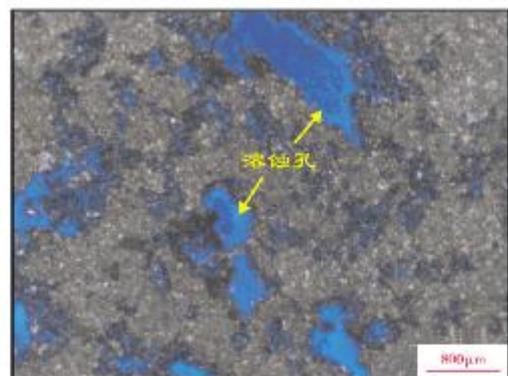
(a) 粉晶白云岩。发育溶孔, 渗流粉砂与亮晶白云石充填。苏381井, 4036.29m, 马五亚段。铸体片, 单偏光



(b) 泥晶白云岩。发育溶蚀孔隙, 部分被方解石胶结。苏13井, 3452.40m, 马五亚段。铸体片, 单偏光



(c) 粉晶白云岩。发育溶蚀孔洞, 孔洞被渗流白云石粉砂、畸形白云石、自生石英等不完全充填。苏203井, 3921.25m, 马五亚段。铸体片, 单偏光



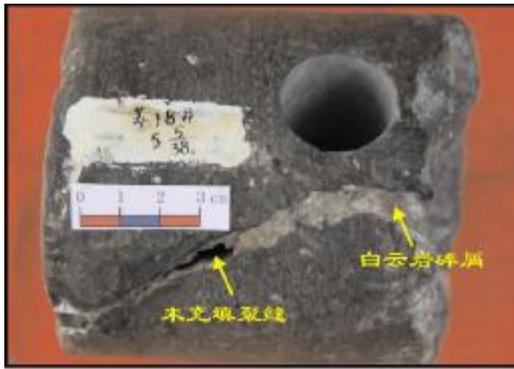
(d) 细粉晶白云岩。发育溶蚀孔隙。苏272井, 4147.21m, 马五亚段。铸体片, 单偏光

图6 靖西地区奥陶系马家沟组中组合晶间溶孔类型

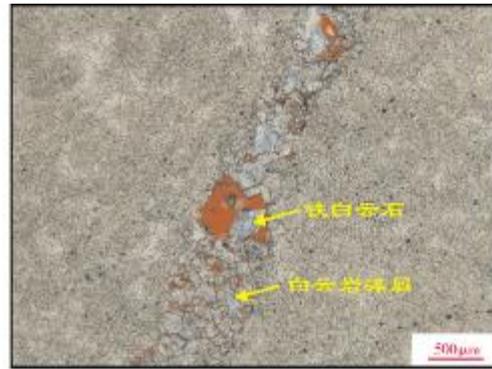
### 2.2.3 构造缝和溶蚀缝

裂缝在研究区马家沟组中组合白云岩储层中局部发育,其中大部分被充填,仅有少部分构成了有效的

储集空间。发育在中组合白云岩储层的裂缝以构造缝(图 7a)为主,其次为溶蚀缝(图 7b),也含少量压溶构造缝,这几类裂缝在中组合的各个小层中均有分布。



(a) 粉晶白云岩岩心。构造缝中白云岩半充填。苏18井,马五<sub>5</sub>亚段



(b) 泥粉晶颗粒白云岩。发育溶蚀缝,裂缝中白云岩碎屑半充填。苏2井,3574.65m,马五<sub>5</sub>亚段。铸体片,单偏光

图7 靖西地区奥陶系马家沟组中组合裂缝类型

## 2.3 储层孔渗特征

岩心物性测试结果统计表明,研究区马家沟组中组合白云岩储层的孔隙度分布范围为0.12%~13.81%,平均为2.3%,以1%~3%居多,占45.82%(图 8a);渗透率分布范围为(0.0007~70.5)×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,平均为0.33×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,其中以(0.001~0.1)×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>最多,占74.4%(图 8b)。这些统计结果表明,该区中组合白云岩储层具有低孔、低渗特征。

的相控型储层,储集层质量优劣严格受沉积微相控制。在前人工作的基础上,本次对钻井岩心和铸体薄片资料的研究表明,沉积相严格控制着中组合的岩性区域分布,马五<sub>5</sub>亚期是盆地内的一次较大海侵期,沉积相带围绕盆地东部石灰岩坪(马五<sub>5</sub>亚期为膏盐洼地)呈环带状分布。自东向西岩性分布具有以石灰岩为主向白云岩为主过渡的趋势,依次发育石灰岩坪、含白云质灰岩坪、白云岩坪,并在局部发育滩相沉积(图 9)。颗粒滩相沉积控制晶间孔储层发育,经后期白云石化作用形成粗粉晶结构的白云岩,多发育为有效的晶间孔储层。具有颗粒和架状结构的石灰岩在成岩过程中优先白云石化,经岩溶作用改造后可形成晶间孔和晶间溶孔型储层,这是研究区中组合白云岩储层的主要孔隙类型。岩心实验数据统计表明,研究区中组合储层不同沉积微相的孔

## 3 影响储层形成的主控因素分析

### 3.1 沉积相对储层形成的影响

沉积相对碳酸盐岩储层的发育具有重要的控制作用<sup>[4-5]</sup>。研究区马家沟组中组合白云岩储层为典型

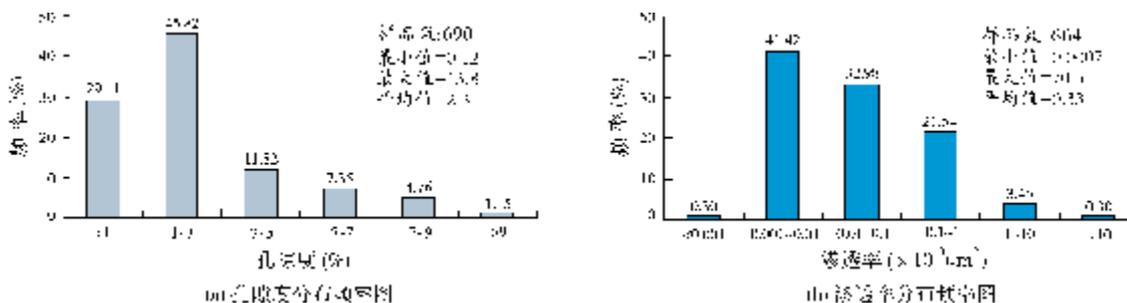


图8 靖西地区奥陶系马家沟组中组合储层物性分布频率图

隙度发育由好至差的顺序为颗粒滩、白云岩坪、含泥白云岩坪及含白云质灰岩坪(图 10),在马五<sub>5</sub>亚期未出现含泥白云岩坪(图 9)

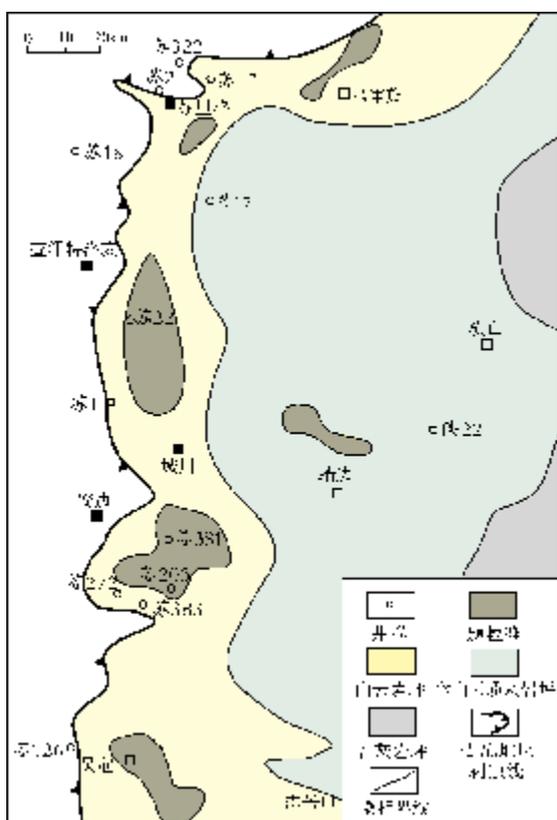


图 9 靖西地区奥陶系马五<sub>5</sub>亚期沉积微相图

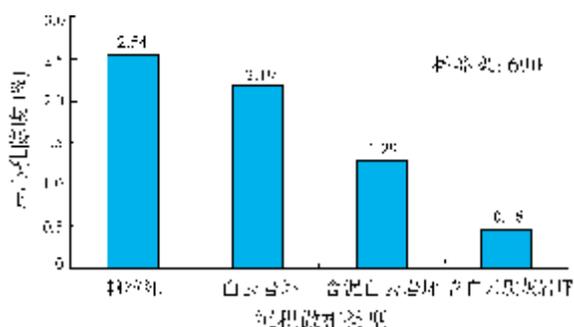


图 10 靖西地区奥陶系马家沟组中组合储层沉积微相类型与岩心孔隙度关系图

### 3.2 成岩作用对储层形成的影响

研究区成岩作用包括准同生白云石化作用、重结晶作用、埋藏溶蚀作用、表生岩溶作用、方解石胶结作用、构造作用、充填作用、压实压溶作用、去白云

石化作用等(图 11),它们对储层的构建具有建设性和破坏性两类相反的意义。建设性成岩作用主要有白云石化作用、重结晶作用、埋藏溶蚀作用、构造作用与表生岩溶作用等,破坏性成岩作用主要有方解石/白云石胶结作用与充填作用、去白云石化作用、压实压溶作用等。

#### 3.2.1 白云石化作用

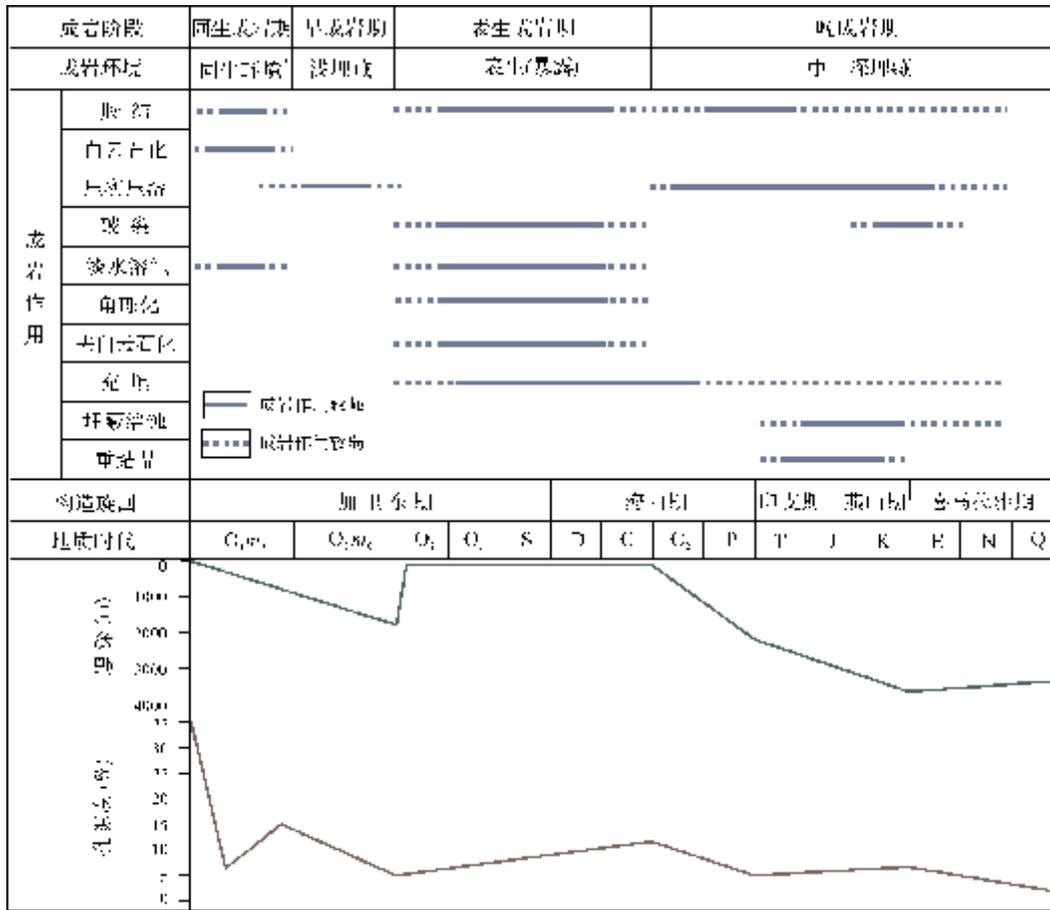
白云石化作用是研究区中组合白云岩储层储集空间构建的最重要的成岩作用,有助于孔隙型白云岩储层的形成,能够使储层的孔隙度增加 10%左右。它所形成的晶间孔是研究区中组合储层的重要储集空间,并且为以后的溶蚀作用创造良好的条件。研究区白云岩以深灰色泥粉晶—粉晶结构为主,晶体多以他形镶嵌接触;阴极发光为暗红色—极暗红色光; $\delta^{13}\text{C}$  平均值为  $-0.7\%$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $-6.89\%$ ;稀土元素 Eu 为弱—中等负异常, Ce 为弱负异常。这些特征表明白云石化流体为盐度较高的碱性流体,且与海水密切相关,因此认为,研究区白云岩为准同生白云石化作用所形成的。

#### 3.2.2 溶蚀作用

对于碳酸盐岩储集层来说,溶蚀作用是一种提高孔渗性能的建设性成岩作用,是形成优质储集层的关键<sup>[6]</sup>。通过研究区岩心样品和镜下薄片的观察,中组合白云岩储层主要经历了三期溶蚀作用:同生成岩阶段大气淡水溶蚀作用、构造抬升期表生溶蚀作用以及埋藏期溶蚀作用。

同生成岩阶段大气淡水溶蚀作用 盆地东部洼地(图1)沉积层序研究表明,马五<sub>5</sub>、马五<sub>7</sub>、马五<sub>9</sub>三个亚段同为夹在蒸发岩层序中的短期海侵沉积<sup>[7-8]</sup>。研究区在马五<sub>5</sub>、马五<sub>7</sub>、马五<sub>9</sub>三个海侵期均处于相对浅水高能环境,发育颗粒滩相,该类微相易于经过白云石化作用形成晶间孔。在随后进入的相对海退期,部分储层直接暴露地表,在大气淡水淋溶作用下,晶间孔经过岩溶水溶蚀形成晶间溶孔或溶蚀孔,改善了储层储集性能。

构造抬升期表生溶蚀作用 加里东末期开始的整体构造抬升,使鄂尔多斯地区下古生界遭受了从中奥陶世—早石炭世长达1亿多年的风化剥蚀<sup>[8]</sup>(图 11)。由于长期暴露剥蚀,研究区下奥陶统马家沟组中组合储层直接与岩溶水接触,岩溶水沿断裂、裂缝等通道往下渗透,形成各种各样的溶蚀孔、洞、缝,使



注: 包括大气降水、混合水及深埋期等成岩环境

图 11 靖西地区马家沟组中组合储层成岩作用与孔隙演化关系图

0,m 马家沟期

原岩角砾化。

埋藏期溶蚀作用 晚石炭世, 研究区又开始接受含煤系地层沉积, 且部分含煤系地层直接与中组合储层接触<sup>[8]</sup>。在后期的深埋藏过程中, 随着温度压力的不断上升, 上覆含煤系地层不断释放酸性压释水<sup>[9]</sup>。这些酸性溶液沿裂缝等通道进入中组合储层内, 不但溶蚀了孔隙或裂缝中的充填物, 还溶蚀了孔、缝边壁基岩, 形成溶蚀扩溶孔, 极大地扩大了孔隙并增加了孔隙度, 但在部分孔洞中生长了石英(图 6c)及萤石等矿物。

### 3.2.3 充填(胶结)作用

研究区内发育少量的微裂缝和溶蚀孔, 而充填物对该类储集空间的储集性具有明显的控制作用, 能使孔隙空间缩小 50%~95%, 甚至局部消失, 从而使储层失去了储集性能; 而部分未被充填或半充填

的微裂缝和溶蚀孔则构成了中组合白云岩储层的有效储集空间。该区碳酸盐岩孔、洞、缝中充填物以化学沉积充填物和物理充填物为主, 且不同时期和环境下, 充填物不同。化学沉积充填物主要为方解石胶结物, 其主要发生在一些溶孔、溶洞中(如图 6b); 物理充填物主要为白云石渗流粉砂或淡水白云石, 在一些溶蚀孔隙(图 6a,6c)、构造裂缝或溶蚀缝中(图 7)均有显示。少部分孔隙中同时含化学充填物和物理充填物。

### 3.2.4 其他成岩作用

在漫长的成岩期, 研究区马家沟组中组合白云岩储层经历了复杂的成岩作用, 除上述几种类型外, 还存在其他一些成岩作用, 如压实、压溶、重结晶、去白云石化, 以及由构造运动所引起的破裂等(图 11)。这些成岩作用都具有一定的成岩成因意义, 但

与前几节所述的成岩作用相比较, 它们对碳酸盐岩储集性能的建设性和破坏性意义都相对较小, 在此不作详细讨论。

## 4 结 论

(1)靖西地区马家沟组中组合储层的岩石类型主要是粉晶白云岩和泥粉晶白云岩, 主要储集岩为粉晶白云岩、粉-细晶白云岩、细晶白云岩等晶粒白云岩。

(2)研究区储层的类型主要为白云岩储层, 具有低孔、低渗特征; 储集空间类型主要为晶间孔与晶间溶孔, 局部见少量的晶间微孔、溶洞、构造裂缝和溶蚀缝。

(3)研究区白云岩储层为典型的相控型储层, 颗粒滩和白云岩坪为最有利的沉积微相。成岩作用在储层孔隙空间的建造中也发挥了重要作用, 其中白云石化作用与表生岩溶作用为主要的建设性成岩作用, 而机械充填作用与化学胶结作用为主要的破坏性成岩作用。

## 参 考 文 献

- [1] 冯增昭, 张吉森. 鄂尔多斯地区奥陶纪地层岩相古地理[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- [2] 杨华, 包洪平. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J]. 天然气工业, 2011, 31(12):11-20.
- [3] 何江, 方少仙, 侯方浩, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田中奥陶统马家沟组岩溶型储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3):350-356.
- [4] 朱如凯, 郭红莉, 高志勇, 等. 中国海相储层分布特征与形成主控因素[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 I):40-45.
- [5] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式[J]. 地质学报, 2010, 84(8):1087-1094.
- [6] 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 858-865.
- [7] 包洪平, 杨承运, 黄建松. “干化蒸发”与“回灌重溶”——对鄂尔多斯盆地东部奥陶系蒸发岩成因的新认识[J]. 古地理学报, 2006, 6(3):279-287.
- [8] 何自新, 等. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
- [9] 王小蓉, 雷卞军, 欧家强, 等. 靖边气田统 5 井区马五<sub>3</sub>成岩作用研究[J]. 断块油气田, 2007, 14 (4):10-14.

编辑:吴厚松

## Characteristics and Controlling Factors of the Middle Array of Ordovician Majiagou Reservoirs to the West of Jingbian Gas Field, Ordos Basin

Yu Zhou, Sun Liuyi, Wu Xingning, Wu Dongxu, Yao Xuehui, Ding Zhenchun

**Abstract:** Based on observation of well core samples and sections and physical analysis for the middle array of Ordovician Majiagou dolostone reservoirs to the west of Jingbian Gas Field, it is shown that the reservoir rock mainly consist of siltcrystal dolostone, siltcrystal-micrite dolostone and micrite dolostone in lithology, which occupy 33%, 21% and 15% respectively in statistical rock sections. The types of Primary reservoir space are intercrystalline pores and intercrystalline dissolved pores in dominant, followed by karst caves and solution fractures. The reservoirs are characterized of low porosity and low permeability. The porosity is 1%~3% which takes 45.82% of total samples and the permeability is 0.001~0.1 mD which takes 74.4%. Development of the reservoirs is obviously controlled by sedimentation and diagenesis. Dolostone tidal flats and grainstone shoals are the good sedimentary facies. Dolomitization and epi-karstification are the main contribution to reservoir pore formation.

**Key words:** Ordovician; Majiagou Formation; Reservoir characteristics; Controlling factor; Jingbian Gas Field; Ordos Basin

Yu Zhou; male, M.S. degree in progress at China University of Petroleum, Changping, Beijing, 102249, China