

文章编号: 1672-9854(2007)-01-0012-09

# 鄂尔多斯盆地靖边潜台及其周边地区中奥陶统 马家沟组马五<sub>1-4</sub>亚段储层非均质性主要控制因素

乔琳<sup>1</sup>, 沈昭国<sup>1</sup>, 方少仙<sup>1</sup>, 侯方浩<sup>1</sup>  
傅锁堂<sup>2</sup>, 徐黎明<sup>2</sup>, 马振芳<sup>2</sup>, 阎荣辉<sup>2</sup>

(1 西南石油大学; 2 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司)



乔琳

**摘要** 鄂尔多斯盆地靖边潜台及相邻区域在马五<sub>1-4</sub>时总体上为(内)陆棚盆缘坪亚环境。储层主要岩性为粉晶白云岩及含硬石膏结核和/或柱状晶的粉晶白云岩。地层在岩性上的分布差异是控制储层非均质发育的基础性因素,以含硬石膏结核和/或柱状晶的粉晶白云岩对研究区更具控制意义。其他主要控制因素还有地质背景、古岩溶成岩作用、构造裂隙及断层分布等,古地貌、储层有效厚度以及非储层发育程度等对储层非均质性也具一定影响。靖边潜台为目前天然气主产区,靠近研究区的西侧和东侧的储集性均较差,西侧地层剥蚀严重,东侧溶蚀作用过于强烈,储集性能均遭到严重破坏。

**关键词** 马家沟组;碳酸盐岩储层;储层物性;控制因素;古岩溶;成岩作用;靖边潜台;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

**乔琳** 1980年生,2003年毕业于成都信息工程学院,现为西南石油大学硕士研究生。通讯地址: 610500 四川省成都市新都区西南石油大学资源与环境学院;电话: (028) 83033171

储层非均质性是指储层在形成过程中受沉积环境、成岩作用和构造作用等的影响,在空间及内部属性上都存在不均匀的变化<sup>[1]</sup>,它直接决定了储层的含油气性。认识并掌握造成储层非均质性的控制因素,对开发井的部署、储量预测计算及勘探潜力的确定等均有较大助益,对油气勘探也具有指导意义。

对鄂尔多斯盆地奥陶系储层特征及其控制因素已有较多讨论。李振宏等<sup>[2]</sup>,吴熙纯等<sup>[3]</sup>,王雷等<sup>[4]</sup>分别对鄂尔多斯盆地东部、南部及西南缘作了讨论;马永生等<sup>[5]</sup>对本文所述的研究区——靖边潜台等的储层非均质性作了比较详细的论述,但他们论述的是所划分的微相或微相组合控制岩层孔隙空间发育程度,进而导致该区储集性能纵横向上的非均质性,讨论还比较局限。

鄂尔多斯盆地中部靖边潜台及其周边地区中奥陶统马家沟组马五<sub>1-4</sub>亚段风化壳储层纵向上和平面上都存在较强的储层非均质性,本文对造成这种非均质性的主要控制因素进行比较全面的讨论。这些控制因素包括地质背景、岩性、古岩溶成岩作用、构造裂隙及断层等,笔者还特别强调了岩性对储层非均质性的控制意义。

## 1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台的西部,地跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,是一个矩形构造盆地,现今构造格架始于燕山运动中期,发展并定型于喜马拉雅运动,可划分为六个一级构造单元。盆地中部是伊陕(或陕北)斜坡,向东为晋西挠褶带,向西依次为天

收稿日期: 2006-08-07

基金项目: 四川重点学科建设项目(编号: SZD0414)

环坳陷、西缘逆冲带,北部为伊盟隆起,南面为渭北隆起。靖边潜台及其周边地区位于现今构造伊陕斜坡的中部,北起乌审旗,南至志丹,东起榆林,西至城川,南北长 210 km,东西宽 130 km,面积 27 000 余平方千米(图 1)。靖边潜台的东侧为一古凹陷,西南侧有一“L”型的古隆起,潜台位于这两个正负向构造单元之间,构成了古地形上的过渡单元。

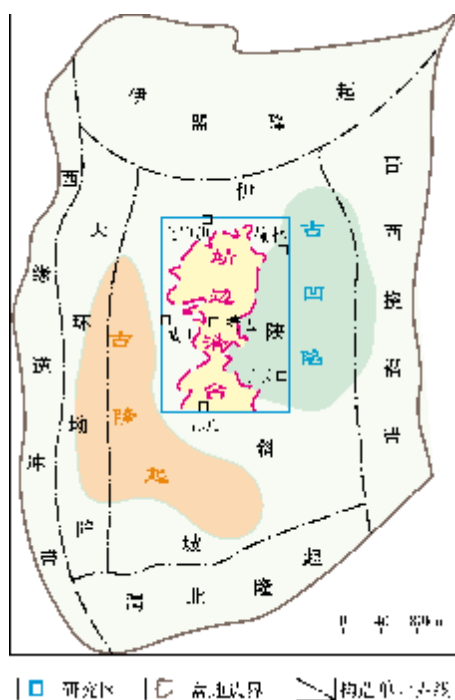


图 1 鄂尔多斯盆地靖边潜台及周边构造分布(据文献[1]修改)

鄂尔多斯盆地靖边潜台及东侧相邻区域(包括了研究区以东的一部分)在马五<sub>1-4</sub>时的沉积古地理环境如图 2 所示,总体上为(内)陆棚盆地盆缘坪亚环境。其中,研究区的中、西侧处于硬石膏—白云岩盆缘坪亚环境<sup>[6]</sup>,宽度较大,主要发育微—粉晶白云岩、(含)硬石膏质(结核)粉晶白云岩,少量硬石膏岩和微—粉晶石灰岩,组成马五<sub>1-4</sub>亚段的主要储渗体;研究区东侧处于白云岩—硬石膏盆缘坪亚环境,较窄、较陡,致使沉积(坳陷)中心偏向东侧,除白云岩储层发育较差外,由于由西向东沉积环境中含盐度逐渐增高,致使无储集性能的硬石膏岩和白云质硬石膏岩相对发育。

中奥陶统马家沟组沉积后至中石炭世之间受全球性构造事件影响,华北地台经历了 130 余 Ma 的

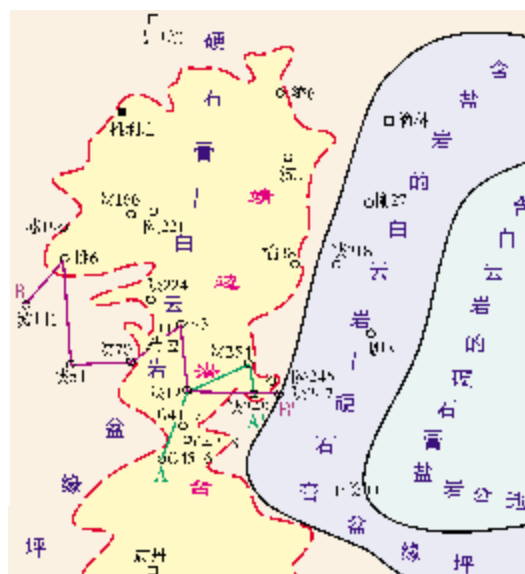


图 2 鄂尔多斯盆地靖边潜台及东侧相邻区域马五<sub>1-4</sub>亚段沉积环境(据文献[6]修改)

沉积间断,发育古风化壳。鄂尔多斯盆地受南北两侧洋壳相向俯冲及西侧贺兰裂谷重新拉开形成碰撞谷的双重作用,逐渐发育为北、西、南三面抬升,向东呈一“马蹄形”缓倾斜的古岩溶地貌。与此同时,在地壳均衡补偿作用下,靖边潜台东侧发育为近南北向的补偿坳陷盆地,西缘在城川以西逐渐抬升过渡并与“L”型古隆起相连<sup>[6]</sup>(图 1)。靖边潜台位于北、西、南三面抬升区与东侧补偿坳陷盆地的过渡地带,发育为一由西向东倾斜度仅为 0.1° 左右的地层几乎水平的岩溶台地区,马五<sub>1-4</sub>亚段地层保存相对较好较全,为目前天然气主产区。在潜台区的西部为一向东倾斜的岩溶斜坡,地层剥蚀严重,马五<sub>1-4</sub>亚段地层已遭剥蚀;潜台区东部逐渐靠近岩溶盆地,为汇水区,溶蚀作用可延至马五<sub>4</sub>储集岩亚段地层以下。

## 2 岩性

地质体在岩性上的非均质性是气藏储层非均质性、特别是纵向各小层间储层非均质性的最重要控制因素。从图 2 可见,研究区在马五<sub>1-4</sub>时所处的沉积环境主要为硬石膏—白云岩盆缘坪,在这一环境中主要发育了微—细粉晶白云岩、含硬石膏结核和/或柱状晶白云岩、白云质硬石膏岩、含泥质白云岩及少量石灰岩等。研究表明,其中粉晶白云岩、含硬石

① 张吉森,张均,徐黎明. 陕甘宁盆地气区地质构造及勘探目标选择. 长庆油田分公司, 1995.

膏结核和 / 或柱状晶的粉晶白云岩这两种岩性是研究区马家沟组马五<sub>1</sub>—马五<sub>4</sub>亚段储层发育的主要物质基础。笔者认为,对储层非均质性的控制作用而言,岩性是第一位的,具有基础性的意义,相比之下,上面所述的这两种岩性又属首选,它们对研究区的储层非均质性最具控制意义。对这两种岩性作进一步比较,其中含硬石膏结核和 / 或柱状晶的粉晶白云岩在研究区有效储层段中所占地层厚度相对较大,而且无论表生成岩作用或埋藏成岩作用所形成的次生孔隙也主要发育在这一岩性地层中,因此它对研究区的储层非均质性发育又更为重要。在所研究的地层中,马五<sub>3</sub>和马五<sub>2</sub>是储集性较好的两个小层,它们主要发育粉晶白云岩、含硬石膏结核和 / 或柱状晶的粉晶白云岩(图3)。

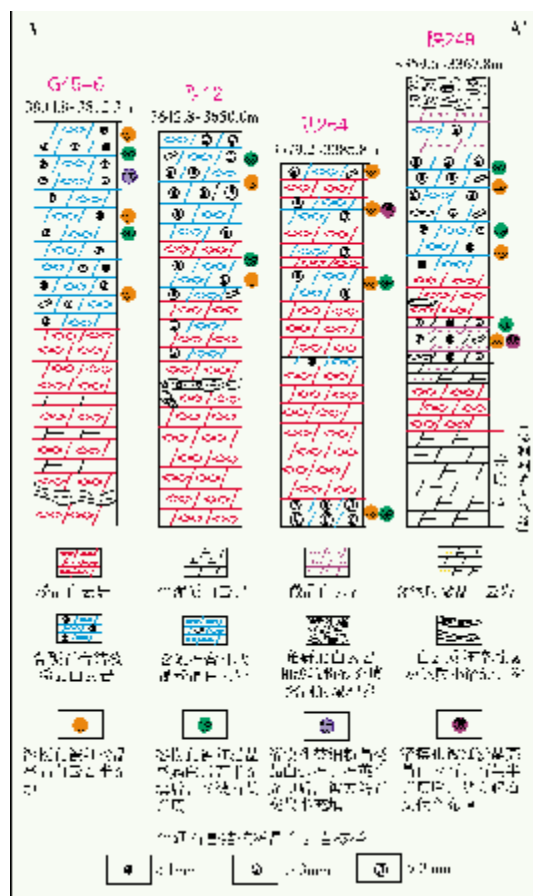


图3 鄂尔多斯盆地 G45-6 井—陕 249 井马五<sub>2</sub>储层分布及横向对比

A—A' 连井剖面见图2

研究层段以白云岩为主,在含硬石膏结核和 / 或柱状晶的粉晶白云岩及其衍生的细角砾屑<sup>①</sup>或角砾化白云岩中,结核和柱状晶体的含量相差悬殊,结核含量变化范围约为 5%~30%不等,柱状晶的含量变化范围则为 1%~5%。经漫长的成岩改造过程,目前只有深部地层中尚有硬石膏结核和柱状晶保存,如马五<sub>4</sub>储层分布及横向对比图(图4)中的林5井和陕12井,在其他绝大部分井中因受表生成岩作用溶蚀,这些结核和柱状晶已变成溶模孔隙。但在后来的成岩过程中,孔隙又接受了多期成岩矿物的充填、沉淀,对储层储集性影响很大。一般情况下结核含量高、核径大的粉晶白云岩基岩中白云石晶径也较粗,常含晶间孔,在铸体薄片中最可达 3%~5%。

在一部分粉晶白云岩中,特别是粗粉晶级白云岩中,常可发育晶间孔隙。当白云石晶径达到 0.03~0.05 mm 或更粗时,最高晶间孔含量在铸体薄片中最可达 8%~10%,可成为较优的储集层(图5a)。粉晶白云岩既可以与含硬石膏结核和 / 或柱状晶的粉晶白云岩,甚至与层状鸡雏状白云质硬石膏岩共生,呈薄—中层状互层,或两种岩性逐渐过渡,也可以呈现为具一定厚度的层状单独产出。一般来讲,如上、下为含硬石膏结核的白云岩,其中结核含量高、核径大的,基岩白云岩的晶径也相对较粗,并在含粒间孔的情况下,与之伴生的粉晶白云岩亦表现出晶径较粗、晶间孔发育。但当上、下含硬石膏结核粉晶白云岩不存在时,则粉晶白云岩单独呈厚块状,晶径一般较细、晶间孔隙相对较少,甚至不发育。从图3可看出马五<sub>2</sub>以发育粉晶白云岩为主。

### 3 古岩溶成岩作用

“岩溶是指水流与可溶岩石相互作用的过程以及由此而产生的地表及地下地质现象的总和”,“岩溶作用不仅包括化学的溶解及随之而产生的机械破坏作用,而且还包括化学沉积和机械沉积作用”<sup>②</sup>。古岩溶成岩作用,包括表生成岩期和埋藏成岩期古岩溶作用(包括溶蚀和充填作用)<sup>[7]</sup>,对研究层段而言最重要的是表生成岩裸露期的溶蚀对储集孔隙发育的控制作用。

鄂尔多斯盆地马家沟组沉积后经历了 130 余

① 此衍生角砾屑(状)白云岩与溶洞充填角砾屑白云岩不一样,此处是在含硬石膏结核和 / 或柱状晶的粉晶白云岩中因裂碎缝特别发育而切割原岩成角砾屑(状)白云岩,这种角砾屑往往被含粒间孔的渗流粉砂充填,是好的储层岩石

② 中国地质科学院岩溶地质研究所,中国石油长庆油田分公司. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶特征研究. 2002.

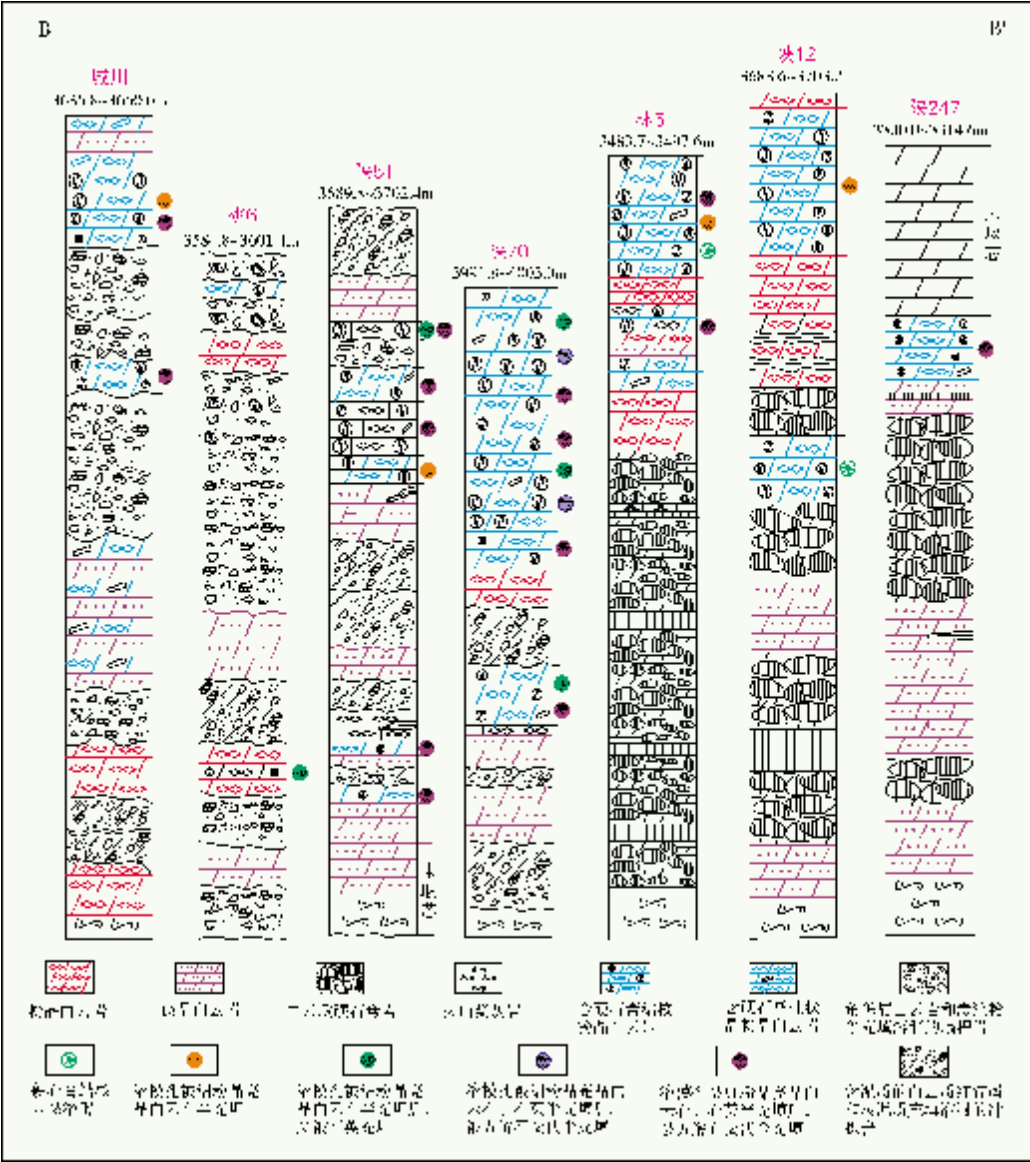


图4 鄂尔多斯盆地城川1井—陕247井马五<sub>1-4</sub>储层分布及横向对比  
B—B'连井剖面见图2

Ma表生成岩期的古岩溶作用,这种作用在马五<sub>1-4</sub>亚段地层中表现特别强烈,以孔隙建设性作用为主。中石炭世本溪期后进入埋藏期,发育埋藏岩溶成岩作用,改善表生成岩期形成的孔隙网络系统。其他因素引发的储层非均质地质作用主要是叠加在古岩溶作用产物之上的,因此古岩溶成岩作用是引起马家沟组马五<sub>1-4</sub>亚段地层储层非均质性的最根本因素。

### 3.1 表生成岩期古岩溶作用

表生成岩期岩溶是研究区储集空间形成的最重

要地质作用,它形成了最主要的孔隙网络系统。

沿着岩溶渗流管道锋面下渗的大气淡水首先在含硬石膏结核和/或柱状晶的粉晶白云岩内发生溶蚀,特别当基岩粉晶白云岩中又有晶间孔隙的情况下,岩溶作用将沿该地层向纵深推进。另一方面,硬石膏结核的溶解过程首先要水化转变为(软)石膏,体积增加31%,对周围基岩产生极大的膨胀压力,施压于围岩,而(软)石膏溶解后形成溶模孔,又对周围基岩释压。这一过程反复发生,在结核间或周边基岩中产生裂碎缝,并可经大气淡水溶滤成扩溶裂

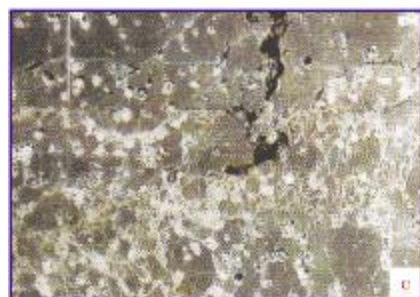




(a) 粉晶白云岩, 白云石晶径达0.05~0.08mm, 半自形镶嵌结构, 含晶间孔10%左右(氮孔隙度9.6%)。单偏光,  $\times 100$ , 铸体片, 陕201井马五<sub>1</sub><sup>2</sup>, 5-78/132, 2865.58~2865.60m



(b) 硬石膏结核溶模孔被细粉晶亮晶白云石、石英半充填, 上部有一粒自形晶方解石淀出。单偏光,  $\times 65$ , 铸体片, 坂川1井马五<sub>2</sub><sup>2</sup>, 2-31/36, 3636.21~3636.23m



(c) 含硬石膏结核细晶白云岩中发育纵向为主、被含粒间孔渗流粉砂充填的裂隙缝和扩溶裂隙缝, 并连接两个或若干个结核溶模孔。原岩被分割成角砾状。G10-9井, 马五<sub>2</sub><sup>2</sup>, 2-81/130, 3176.81~3176.91m



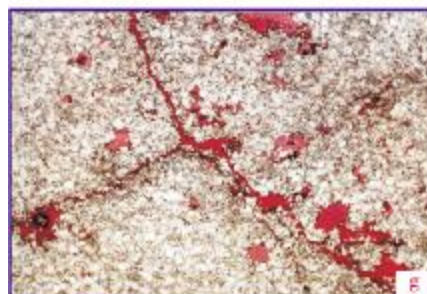
(d) 含硬石膏结核细晶白云岩中网状裂隙缝和扩溶裂隙缝早期被含粒间孔的渗流粉砂半充填, 埋藏溶解作用发生在渗流粉砂中, 溶孔中有自形石英淀出。单偏光,  $\times 30$ , 铸体片, G42-8井马五<sub>1</sub><sup>1</sup>, 1-149/173, 3679.83~3679.85m



(e) 垂直岩心的样品栓中沿30°左右的剪切缝裂开(岩心中一般很难观察到), 裂开面上有的有少量暗色方解石贴裂缝面半充填, 个别裂开面上有黄铁矿淀出。岩心直径2.5cm



(f) 垂直岩心的样品栓中发育近纵向的裂隙, 裂隙面不平整状。岩心直径2.5cm



(g) 含硬石膏柱状晶的粉晶白云岩, 柱状晶溶模孔有弱的扩溶, 粉晶白云岩内有少量晶间孔隙, 二个方向的共轭剪切裂隙贯穿早期孔隙。单偏光,  $\times 40$ , 铸体片, 陕254井马五<sub>2</sub><sup>2</sup>, 5-111/164, 3284.25~3284.27m



(h) 与硬石膏结核溶模孔斜切的微张裂隙使溶模孔中早期充填物发生溶解。单偏光,  $\times 30$ , 铸体片, 统1井马五<sub>1</sub><sup>1</sup>, 6-72/141, 3055.36~3055.38m

图5 马家沟组马五<sub>1-4</sub>亚段储集空间类型

碎缝。结核和柱状晶溶模孔及一部分裂碎缝由早期细粉晶亮晶白云石部分(半)充填,残余溶模孔隙埋藏期又可或多或少地沉淀出少量自生石英,有时还有少量高岭石,较晚期的亮晶方解石交代亮晶白云石并伴之发生充填作用(图 5b)。一部分被细粉晶亮晶白云石半充填后的结核残余孔隙及大部分裂碎缝则被含粒间孔的渗流粉砂半充填。由于各小层中,硬石膏结核和/或柱状晶含量不一致,有的甚至很少存在,因此所派生的裂碎缝的大小、密度等也不一致,这必然导致各小层发生表生岩溶作用的强度及孔隙发育程度的巨大差异。例如研究区大多数井的马五<sub>1</sub><sup>3</sup>小层中含硬石膏结核粉晶白云岩占该小层的 1/2~2/3,有的层中结核含量较多,可达 20%~30%,核径也相对较大,其溶模孔及伴生的裂碎缝又为大气淡水提供了活跃的通道和空间,更促使了溶解作用顺层向纵深发育,因而成为靖边潜台区最优的储层。充填作用虽使孔隙消失 1/3~1/2 左右,但还残余 1/2~2/3 的储集空间,具较好的储集性。马五<sub>4</sub><sup>1</sup>小层中含硬石膏结核粉晶白云岩大多不到地层岩石的 1/4(图 4),含量也少,其表生溶蚀形成溶模孔也较少,后期常有方解石交代一充填,部分已被填满,导致储集性能较差。

随着表生淋溶作用的进一步发展,作为下渗流体通道的裂碎缝被继续扩溶,扩溶后的裂碎缝使基岩形成角砾状白云岩;也可因裂碎缝的强烈扩溶,形成细角砾屑白云岩。无论前者或后者,角砾间大多仅被含粒间孔隙的白云质渗流粉砂半充填(图 5c),具有较好的储渗性。由于这类角砾状或细角砾屑白云岩是结核溶模孔,特别是裂碎缝强烈扩溶的产物,空间上与结核层组成间互纹层或薄层,或横向上逐渐过渡。此外,作为下渗大气淡水通道的较小的渗流管道,包括伴生的小溶洞、沟,绝大多数亦被渗流粉砂或含细角砾渗流粉砂充填。所述几方面的共同作用,形成了表生成岩期岩溶的孔隙网络系统。

表生成岩期岩溶作用向纵深发展的同时,在地层中也形成了一些较大的溶洞,有的直径高达 1~2 m,但溶洞一般又被岩溶建造岩充填,包括塌积岩、冲积岩、淀积岩、填积岩等。根据大量岩心和薄片观察,少部分塌积岩层下部角砾间可以被含粒间孔隙的白云质渗流粉砂充填,在其内还可产生成岩期次生孔隙(图 5d),具一定的储集性能。但大多数塌积岩的角砾间是由含泥质或含炭泥质的细碎屑充填,冲积

岩角砾间则被含泥质的白云质细碎屑或炭泥质细碎屑充填,而淀积岩为孔隙水中淀出的方解石(钟乳石),填积岩均为泥质细碎屑或炭质泥岩,后几种情况下一般无储集性能。

## 3.2 埋藏成岩期古岩溶作用

埋藏成岩期古岩溶作用以强烈的次生溶解作用为主,一方面增加了储集空间的量,更主要是改善了表生成岩期所发育的孔隙网络,有的层段中可增加 1%~3%的孔隙度。

据岩心和大量铸体薄片观察,埋藏期的岩溶作用主要叠加在表生成岩期所产生的具有孔隙的组分中,并可沿此组分向侧边岩石扩溶。主要表现为对半充填的硬石膏结核溶模孔的扩溶;此外,在硬石膏结核间发育的裂碎缝内、角砾状细粉晶白云岩和细角砾屑白云岩的砾间以及溶塌角砾屑白云岩的砾间常为具孔隙性的渗流粉砂充填,埋藏成岩的酸性孔隙水沿粒间流动时,将溶蚀其周围组分,形成溶蚀孔、洞、缝(图 5d)。其形态往往随渗流粉砂充填组构而异,其内大多仅有少量自生石英淀出或半充填,局部有方解石充填或半充填。

从上可以看出,以含硬石膏结核和/或柱状晶的粉晶白云岩地层为主体,以及与之成中、薄互层的粉晶白云岩,经历了表生期和埋藏期岩溶及半充填一充填作用,形成成岩期的多层段、大面积的储层孔隙网络系统。

## 4 构造裂隙和断层

### 4.1 裂隙

裂隙是形成良好储层的重要因素之一。裂隙发育的丰度必然影响到储层的非均质性。在由岩性控制和古岩溶形成的孔隙网络的地层内,裂隙的发育将极大地改善储集性能,本次研究在岩心和薄片中看到以下几组裂隙。

(1) 30° 和 60° 左右的剪切共轭裂隙

在所取的 400 多个 2.5 cm 直径的样品栓中,大约有 1/15 存在 30° 左右方向的裂隙(图 5e)。少数样品栓 30° 左右方向裂开面上有炭质沥青衬壁薄膜,铸体薄片亦同样存在,有的还有黄铁矿淀出。有的岩心中充填裂隙中的方解石亦成暗色,表明曾有早期油气的进入,而方解石中可能亦含烃类包体。



岩心中亦可见到  $30^\circ$  左右方向裂隙基础上的扩溶缝,方解石半充填后可有小溶洞残余。这类裂隙既是储集空间,更是重要的渗流通道(图 5g)。 $30^\circ$  和  $60^\circ$  左右的剪切共轭裂隙是燕山期产生的。

#### (2) $80^\circ$ 左右方向近纵向裂隙

此类裂隙与  $30^\circ$  和  $60^\circ$  左右方向剪切共轭裂隙相比则较逊色。在岩心的横断面上,可以看到近于正交的两个  $80^\circ$  左右方向的共轭裂隙,裂隙面大多不平整,早期有方解石半充填,以后有沥青质半充填,局部有扩溶现象。在所取的样品栓中,有 1/25 左右见这类裂隙(图 5f)。裂隙方向总是垂直或基本垂直于结核溶模孔的“假示底”构造发育。同样地,当近纵向裂隙切入半充填的结核溶模孔后,也可使部分早期充填物溶解(图 5h)。 $80^\circ$  左右方向裂隙是印支期产生的。

#### (3) 平行层理方向的裂隙

岩心观察中真正的顺层理方向的裂隙虽存在,但与上两类裂隙相比要少得多。

裂隙除了作为储集空间的功能外,更重要的功能是连通前期形成的储集空间,特别是使那些被致密或较致密白云岩分隔开而孔隙又较为发育的含硬石膏结核粉晶白云岩层能够互相贯通。构造裂隙的形成适与生油、气高峰期相匹配,易于形成多层段、大面积的气储。

## 4.2 断 层

在 G41-7、林 5、陕 51、陕 221 和陕 247 等井中都见到断层,断层带宽度 1~6 m 不等。所见这些井中的断层错动面都为  $30^\circ$  左右方向,拉张性质,断层拉开最大可达 3 cm 左右。断层面和断层角砾间都被来自石炭系的炭质泥岩充填,表明断层是与石炭系地层沟通的,气储已破坏。因之,这些井大多无工业气流,而与之相邻的井则获得高产气流。也见有的白云岩虽未错断,但层理变形可至  $30^\circ$  左右或更大。根据断层和错断面方向及层理变形角度  $30^\circ$  左右判断,断层应该与  $30^\circ$  左右方向共轭裂隙属同期构造应力产生的。

例如在 G41-7 井马五<sub>4</sub>下部发育 6 m 多厚的断层带,测试时仅获 3 000 m<sup>3</sup> 的气,并有 11 m<sup>3</sup> 左右水;在其东南方向 3 000 余米的 G42-8 井测试时获气  $175.35 \times 10^4$  m<sup>3</sup>。同样地,陕 221 井所取岩心中也有 2 m 以上断层带,测试时无气;而其西边 4 000 m

的陕 166 井测试获气  $9.19 \times 10^4$  m<sup>3</sup>。陕 247 井所取岩心中也有 2 m 多断层带,测试时无气;但其西北方向约 3 000 m 的陕 245 井测试时获气  $25.36 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,在陕 247 井西边 3 400 m 的陕 249 井也获高产气流。很明显,断层的发育加强了储层的非均质性。

## 5 其他几种重要因素

### 5.1 古地貌

勘探实践表明,在紧贴岩溶沟槽的边缘往往为低产和无工业气流的井,而距沟槽斜坡一定距离的范围内将获得高产井。对这一现象前人已作了很好的研究<sup>[8-10]</sup>,中国地质科学院桂林岩溶所等单位对此作了比较完整合理的解释<sup>②</sup>。在马家沟组古岩溶斜坡区,上覆砂、泥岩可与不同岩性的若干小层的地层相接触;上覆砂、泥岩中的压释水有下渗进入岩溶含水层的水动力势,但因沉积较松散,压释水中悬浮泥含量较高,在下渗过程中对岩溶斜坡边缘马家沟组地层的岩溶孔隙造成普遍的充填,形成较致密的外衬边带;当埋深增大和埋藏成岩作用继续进行的时候,上覆砂、泥岩中有机质裂解过程中分解出的有机质和 CO<sub>2</sub> 不断增加,同时砂、泥岩压释水的水头势亦不断增大,这时压释水可渗透入距岩溶斜坡一定距离的范围(一般可达 3~5 km 或更远),一方面改善已有的孔隙,同时形成新的次生孔隙,在岩溶斜坡带形成良好储渗体的内衬边带。

较大的岩溶洼地、岩溶天坑周缘也应该形成溶孔发育的内衬边地带。但它们也有不利的因素,因这些地方常是地表径流和部分地下径流的汇聚中心,马家沟组表生成岩期的地表不溶残余物质(以泥质为主)中的一部分被地表径流携带并沉积于此。在石炭纪再度海侵时,入侵的海水会以“扫地”的形式,在较短的时间里将更多的地表残余不溶物质扫入岩溶洼地和天坑内。由于不溶残余物质以泥质、铝土质为主,且很少含有机质,对岩溶洼地和天坑处储集空间的发育产生不利的影响。

靖边潜台区地层近乎水平状展布,因之某一时期活动潜流带也近于平面状展布,导致在某些小层中发育了大面积同层位的岩溶建造岩。如各井中马五<sub>4</sub>小层顶部多为厚度不等的岩溶建造岩;马五<sub>4</sub>西缘斜坡古岩溶最发育,岩溶塌积岩和冲积岩两类角砾屑白云岩常多次叠加,尤以城川 1 井—陕 70 井

区(图4)最强,部分井岩溶占剖面1/2至2/3以上,研究区中、东部尤其在中部地层保存完好,一般岩溶建造岩趋向不发育。许多岩溶建造岩的角砾屑为粉晶白云岩,也常见含硬石膏结核的粉晶白云岩。这表明,作为有利储层的岩石已遭溶塌或崩塌,有的又被地下径流带至异地沉积,无疑对储层起极大的破坏作用。

5.2 储层有效厚度

以几个主要储集小层来说明储层有效厚度的值及分布范围,可看出研究区的储层有效厚度不大且分布不均(表1)。

表1 鄂尔多斯盆地中部马家沟组五段储集小层的有效厚度及分布

层位	地层厚度(m)	有效储层厚度(m)		主要分布区域	统计井(口)
		一般	最厚		
马五 <sub>1</sub> <sup>1</sup>	2~6	1~2	3.4	靖边潜台内,分布面积小。位于风化壳顶部,因剥蚀地层保存不全,储层有效厚度呈零星小块分布	43
马五 <sub>1</sub> <sup>2</sup>	4~8	1~3	4.5	中部气区,东部和西部靠近中部气区的区域;西部和西北部地区大范围及东部局部区域内马五 <sub>1</sub> <sup>2</sup> 以上地层遭受剥蚀	130
马五 <sub>1</sub> <sup>3</sup>	4~6	1~4	5.2	中部气区厚度多大于东部和西部井区;西部和西北部地区大范围及东部局部井区内马五 <sub>1</sub> <sup>3</sup> 以上地层遭受剥蚀	175
马五 <sub>1</sub> <sup>4</sup>	4~6	1~2	3.1	殿市附近陕218井区。西部和西北部地区大范围及东部局部井区内马五 <sub>1</sub> <sup>4</sup> 以上地层遭受剥蚀	87
马五 <sub>2</sub> <sup>2</sup>	3~5	1~2	4.8	杨桥畔附近区域	147
马五 <sub>4</sub> <sup>1</sup>	10~15	1~4	6.2	乌审旗—巴音来登—雷龙湾—桃利庙附近地区,河南附近地区,黄蒿界附近地区,靖边附近地区	123

从表中可以看出,各小层的有效厚度均不大,但马五<sub>1</sub><sup>3</sup>、马五<sub>1</sub><sup>2</sup>和马五<sub>4</sub><sup>1</sup>(图6)小层的有效厚度相对较厚,其它层位相对更薄,但它们均在潜台中部分布较为集中。其中,因为马五<sub>1</sub><sup>3</sup>和马五<sub>1</sub><sup>2</sup>在潜台内地层保存较全,粉晶白云岩、含硬石膏结核和/或柱状晶的粉晶白云岩及其衍生的细角砾屑白云岩较发育,且层内岩溶建造岩不发育(图3),故在潜台内

储层的总有效厚度较厚,成大块状分布。此外,马五<sub>4</sub><sup>1</sup>的西缘处于岩溶斜坡带,侵蚀和层内岩溶极发育,岩溶建造岩可占地层的1/3~1/2,而中、东部层状硬石膏岩、微晶白云岩等非储层发育,部分井(如林5井)可占地层的1/2以上(图4),故储层有效厚度由西向东减薄,一般厚1~4m,西部局部厚5~6m,中部普遍为3~4m。

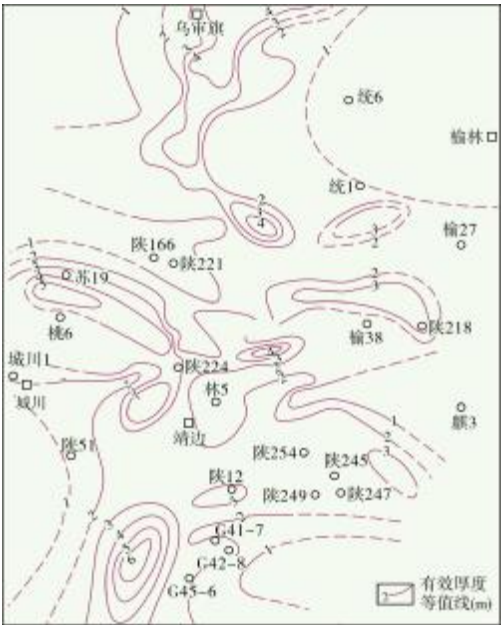


图6 鄂尔多斯盆地靖边潜台及周边中奥陶统马五<sub>1-4</sub>储层有效厚度分布

5.3 非储层发育程度

研究区的储层岩石类型主要为粉晶白云岩、含硬石膏结核和/或柱状晶的粉晶白云岩及其衍生的细角砾状(屑)白云岩;非储层岩石类型包括未被溶蚀的硬石膏结核、结核已被溶蚀但后期又被充填的含硬石膏结核和/或柱状晶的粉晶白云岩、微晶白云岩、少量亮晶鲕粒白云岩及少量微晶灰岩、含粉屑的屑微晶灰岩、(含)泥质微晶白云岩、含钙质微晶白云岩、含硬石膏质白云岩和硬石膏岩等,在同一小层中,非储层岩石越发育,则其储集性能越差。

其中最典型的如马五<sub>4</sub><sup>1</sup>地层,靖边潜台中、东部剖面的中、下部以鸡雏状或层状硬石膏岩为主夹微晶白云岩(图4),林5井和陕12井个别夹层见未被溶蚀的硬石膏结核,剖面下部已溶蚀的结核溶模



孔大多被细粉晶白云石和 / 或方解石大部分充填—全充填,而剖面上部大多被粉晶白云石半充填,使储层非均质性进一步增强,储集性变差。

## 6 结束语

鄂尔多斯盆地中部靖边潜台及其周边地区中奥陶统马家沟组马五<sub>1-4</sub>亚段储层非均质性的控制因素包括地质背景、岩性、古岩溶成岩作用、构造裂隙及断层等,古地貌、储层有效厚度及非储层的发育程度等也对储层非均质性产生明显影响。

中奥陶世马五<sub>1-4</sub>时总体上为(内)陆棚硬石膏—白云岩盆缘坪亚环境。后经历了130余Ma的沉积间断,发育古风化壳。靖边潜台为目前天然气主产区,向潜台区西部为一向东倾斜的岩溶斜坡,地层剥蚀严重,向潜台区东部逐渐靠近岩溶盆地,为汇水区,溶蚀作用可延至马五<sub>4</sub>储集岩亚段地层以下,故研究区靠西侧和东侧的储集性较差。研究区这种平面构造分布造成了储层横向上严重非均质性。

纵向各小层岩性上的差别,横向上因沉积环境的差异而使沉积微相不一致,这是导致纵、横向上储层非均质性的主控因素。储集性能最好的岩性为粉晶白云岩、含硬石膏结核和 / 或柱状晶的粉晶白云岩。

古岩溶成岩作用,包括表生成岩期古岩溶和埋藏成岩期古岩溶作用,前者形成储层孔隙网络系统,后者改善前期形成的孔隙网络系统。孔隙充填程度

的差异增强了储层的非均质性。

另外,古岩溶地貌对储层发育也起一定的控制作用。后期不均匀发育的构造裂隙及断层叠加在古岩溶层段上,更加强了储层的非均质性。

### 参考文献

- [1] 吴胜和,熊琦华. 油气储层地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1998:155-172.
- [2] 李振宏,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学,2004,15(6):604-609.
- [3] 吴熙纯,李培华,金香福,等. 鄂尔多斯南部奥陶系古岩溶带对天然气储层的控制[J]. 石油与天然气地质,1997,18(4):294-299.
- [4] 王雷,史基安,王琪,等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系碳酸盐岩储层主控因素分析[J]. 油气地质与采收率,2005,12(4):10-13.
- [5] 马永生,李启明,关德师. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系马五<sub>1-4</sub>碳酸盐岩微相特征与储层不均质性研究[J]. 沉积学报,1996,14(1):22-30.
- [6] 侯方浩,方少仙,赵敬松,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储层图集[M]. 成都:四川人民出版社,2002:6-16,53.
- [7] 侯方浩,方少仙,沈昭国,等. 白云岩体表生成岩裸露期古风化壳岩溶的规模[J]. 海相油气地质,2005,10(1):19-30.
- [8] 郑聪斌,冀小琳,贾疏原. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳岩溶发育特征[J]. 中国岩溶,1995,14(3):280.
- [9] 何自新,郑聪斌,王彩丽,等. 鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质,2005,(2):37-44.
- [10] 徐世琦,邓洪斌. 长庆油田奥陶系岩溶古地貌对气藏的控制作用[J]. 天然气勘探与开发,2001,24(4):1-6.

编辑:吴厚松

### The Main Controlled Factors of Heterogeneity of Middle Ordovician Majiagou 5<sub>1-4</sub> Reservoir in Jingbian Buried Platform and Its Periphery Area, Ordos Basin

Qiao Lin, Shen Zhaoguo, Fang Shaoxian, Hou Fanghao,  
Fu Suotang, Xu Liming, Ma Zhenfang, Yan Ronghui

**Abstract:** in the buried Jingbian Buried Platform and its periphery area of Ordos Basin, the sedimentary environment of Middle Ordovician Majiagou 5<sub>1-4</sub> Sub-member reservoir is generally the inner shelf basin-marginal flat facies. The Majiagou 5<sub>1-4</sub> reservoir consists of silt-sized crystalline dolostone. Difference of lithology is the basic factor that controls heterogeneity of the reservoir. Silt-sized crystalline dolostone with anhydrite-nodules and/or columnar crystallines plays a predominant role in controlling heterogeneity in this area. Other controlling factors are geologic background, palaeokarst diagenesis, tectonic fissures, fault distribution, etc. In addition, palaeogeomorphology, effective thickness of reservoir and development of non-reservoir are also effective. The main gas-producing zone is in Jingbian Platform but the reservoir did not well-developed or along the west part of the platform where strata are severely eroded and the east part rock is heavily dissolved.

**Key words:** Middle Ordovician; Majiagou Formation; Carbonate reservoir; Reservoir property; Controlled factors; Palaeokarst; Diagenesis; Jingbian Platform; Ordos basin

**Qiao Lin:** female, Master degree in progress at Southwest Petroleum University. Add: Resource and Environment Faculty of Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500 China