

# 鄂尔多斯盆地大牛地气田 奥陶系风化壳储层特征及分布

刘梅<sup>1</sup>, 丁晓琪<sup>1,2</sup>, 万友利<sup>1</sup>, 白晓亮<sup>2</sup>, 陈倩倩<sup>1</sup>, 乐锦鹏<sup>1</sup>

(1 成都理工大学能源学院; 2 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室)

**摘要** 据岩心观察、薄片镜下鉴定、物性特征分析及测井资料,大牛地气田奥陶系马家沟组风化壳储层类型为低孔低渗致密性储层。可将储层分为四类,其中最主要的类型为孔隙型储层,其次为溶蚀孔洞型储层和裂缝-孔洞型储层,再次为裂缝型储层。纵向上,以马家沟组五<sub>1</sub>、五<sub>2</sub>、五<sub>4</sub>、五<sub>5</sub>亚段为储层发育段。预测了有利储层在平面上的分布。

**关键词** 大牛地气田; 奥陶系; 马家沟组; 风化壳储层; 储层特征; 储层预测

中图分类号: TE122.2\*3 文献标识码: A

鄂尔多斯盆地奥陶系以碳酸盐岩为主,在盆地中部已发现靖边岩溶风化壳大气田,地质储量近  $5000 \times 10^8 \text{m}^3$ <sup>[1]</sup>。大牛地气田为靖边气田之后发现的另一个气田,成藏条件与靖边气田相似,但是储层质量差,一直没有大的勘探突破。随着近年来水平井压裂技术的逐渐完善,风化壳气藏的勘探瓶颈已被克服,显示出良好的天然气勘探潜力,许多水平井已获工业气流。

前人对大牛地气田下古生界奥陶系风化壳储层已经进行了较多的研究工作;惠宽洋等<sup>[2]</sup>根据同位素对比分析对气源进行了追踪研究;袁志祥<sup>[3-4]</sup>通过地震资料描述了地震相与天然气勘探的关系,并根据钻井岩心及电测资料识别出6种岩溶相;孟祥豪等<sup>[5]</sup>通过对岩溶作用与研究区其他各类地质作用的综合分析,确定了塔巴庙地区奥陶系风化壳古岩溶地貌类型及基本特征;苏中堂等<sup>[6]</sup>依据钻井岩心、铸体薄片观察及测井资料分析研究了奥陶系古岩溶发育特征及其储层意义。但这些工作对研究区储层的特征及分布等还缺乏具体的描述。本次研究通过储层的岩石学特征、储集空间特征、孔渗特征及测井响应特征等对储层类型进行了划分,并详细描述了各

类储层的纵向以及平面展布情况,以期为进一步的勘探提供有利依据。

## 1 区域地质概况

在晚奥陶世,由于加里东运动的影响,鄂尔多斯盆地整体抬升,以致奥陶系碳酸盐岩长期出露地表,经历了长达1.5亿年的大气淡水淋滤及风化剥蚀,直至石炭纪结束,在马家沟组顶部形成了分布广泛的风化壳<sup>[7-10]</sup>。表生作用沿着风化壳发生的大规模的岩溶在奥陶系顶部的碳酸盐岩中形成了大量的溶蚀孔、洞、缝,形成了碳酸盐岩岩溶储层。

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东北部(图1),气田的奥陶系上马家沟组自下而上分为5个段,其中马五段自上而下可分为10个亚段。奥陶系风化壳为加里东期剥蚀后的残余地层,其中上部马五<sub>1</sub>—马五<sub>3</sub>亚段均受到不同程度剥蚀,马五<sub>4</sub>亚段以下地层保存较全。勘探结果表明,马五<sub>5</sub>亚段也受到了岩溶作用的影响,因此本次研究奥陶系风化壳的主要层位是上马家沟组五段的马五<sub>1</sub>—马五<sub>5</sub>,其厚度为58~100m<sup>[11-12]</sup>。

收稿日期: 2013-04-23; 改回日期: 2013-07-25

基金项目: 本文为国家重大科技专项《鄂尔多斯盆地大牛地致密低渗气田开发示范工程》(编号 2011ZX05045-003)部分成果

刘梅: 女, 1984年生。2006年毕业于长江大学地球物理与石油资源学院,现为成都理工大学在读硕士研究生,矿产普查与勘探专业,主要从事储层岩石学与储层地球化学研究。通讯地址: 610059 四川省成都市二仙桥东三路1号

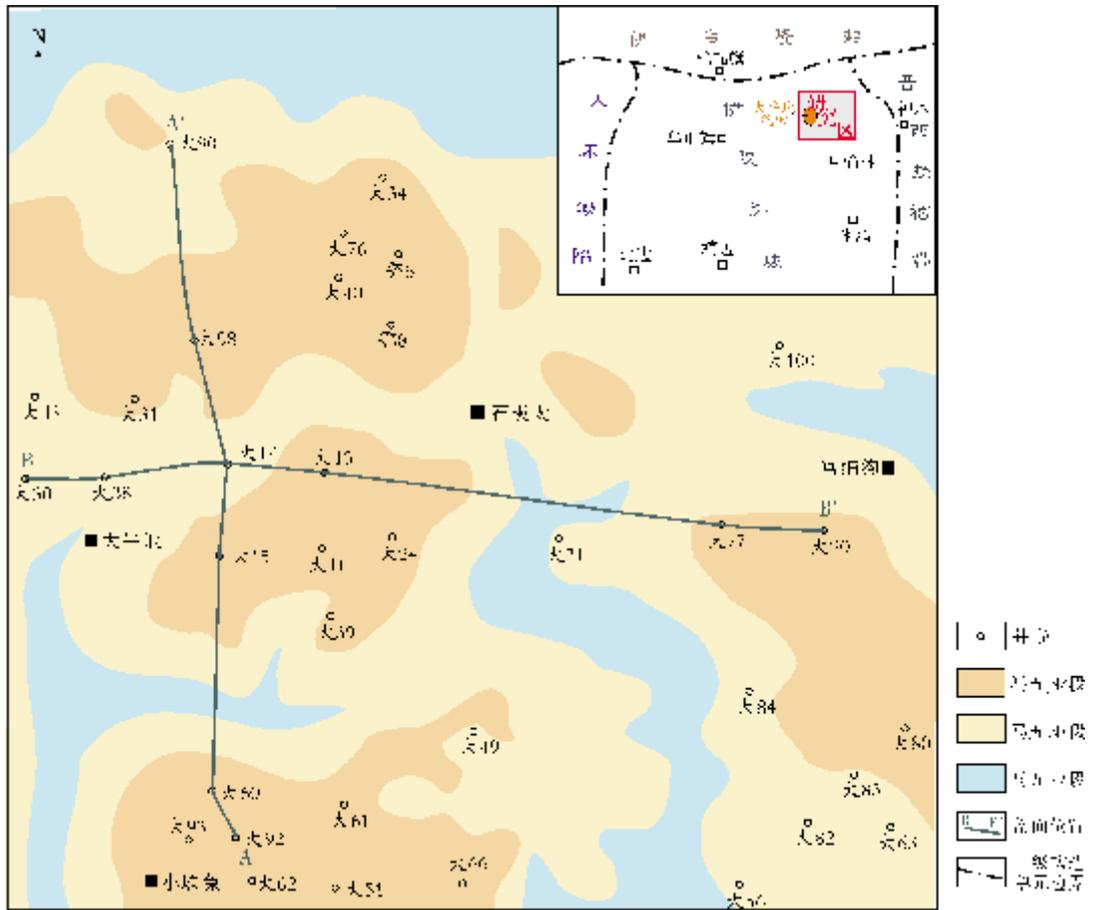


图1 大牛地气田构造位置及前石炭纪古地质图

## 2 储层特征

### 2.1 岩石学特征

通过对钻井岩心以及镜下薄片的观察,研究区马家沟组风化壳储层的岩石类型较多,除普遍发育的白云岩和石灰岩外,还夹有数层泥质岩及膏化微晶白云岩,其中,白云岩主要呈微晶和粉晶,石灰岩主要为泥微晶。

微晶白云岩 具微晶结构,水平纹层较发育,局部可见重结晶现象(图2a)。

粉晶白云岩 具有泥微晶白云石重结晶形成的特点,可见块状构造及残余纹层构造,且晶形较好,晶间孔隙(图2b、2c)较为发育。

泥微晶石灰岩 为马五<sub>3</sub>亚段标志性岩石,且厚度较大,含少量生物碎屑,中上部有不同程度的粉晶白云石化。而马五<sub>1</sub>—马五<sub>4</sub>亚段中的微晶石灰岩具有

层薄、不含生物碎屑等特征,且未发生粉晶白云石化(图2d)。

泥质(含泥)白云岩 具泥微晶结构,块状为主,泥质组分与白云质组分交互沉积,镜下可见成岩泥质纹层(图2e)。

膏化微晶白云岩 马五<sub>1</sub>—马五<sub>2</sub>亚段中的微晶白云岩通常分布有含量不等的板状石膏或结核状石膏。这些石膏通常呈无规律性和无定向性,有的溶蚀后未被全部交代而形成膏溶孔(图2f),有的可被方解石交代(图2g)。

### 2.2 储集空间

通过对研究区岩心观察以及铸体薄片鉴定结果分析得知,大牛地气田奥陶系风化壳储层的储集空间主要包括晶间孔、晶间溶孔、膏溶孔以及裂缝。

晶间孔 是白云石晶体之间的孔隙(图2b),常呈棱角状,多由白云石的重结晶作用形成,受晶体大

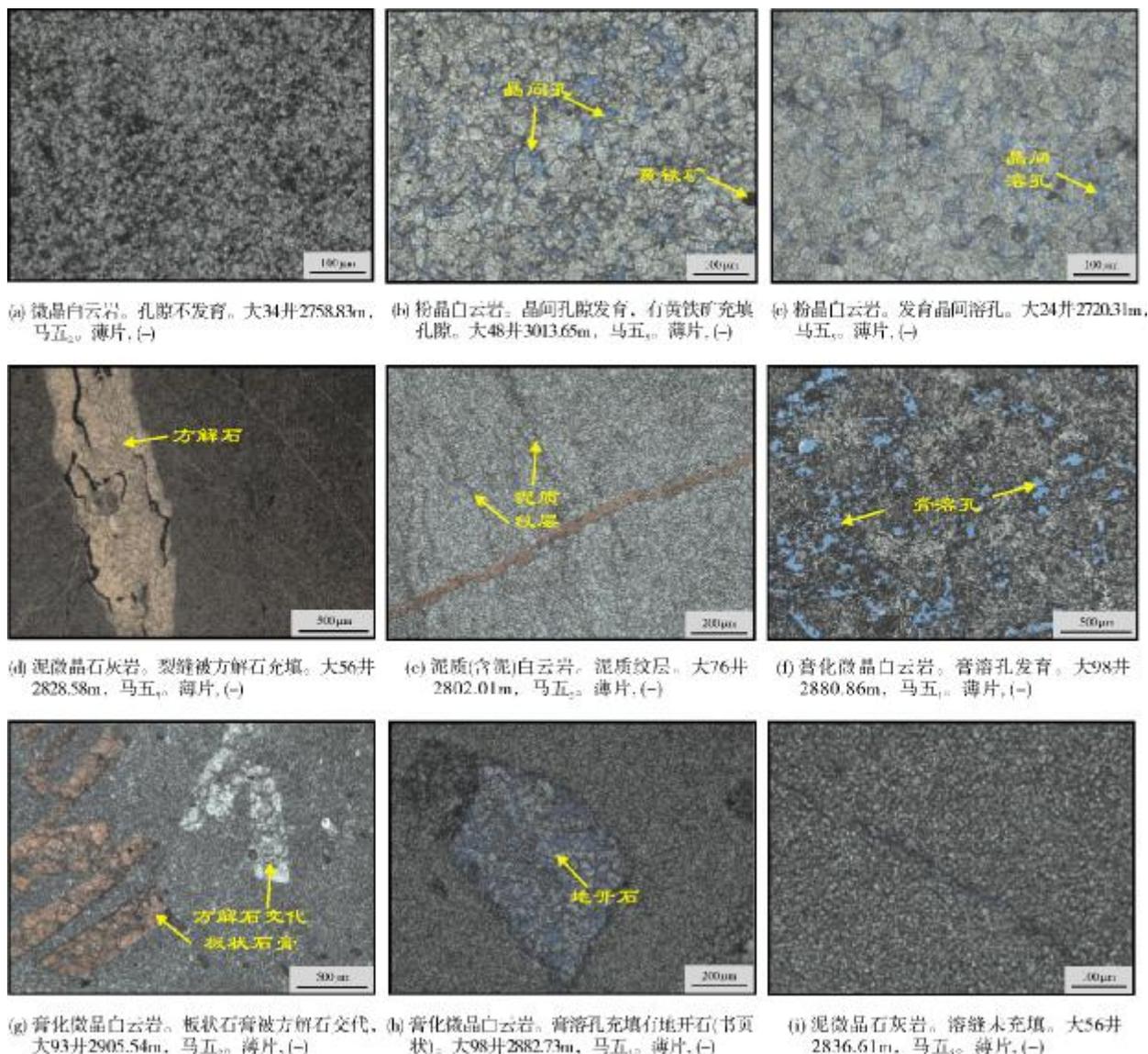


图2 大牛地气田奥陶系马家沟组五段风化壳储层的岩石学特征及其储集空间

小及排列的影响。晶间孔在研究区马五<sub>5</sub>亚段白云岩中最为发育,是重要的储集空间。

**晶间溶孔** 主要是由晶间孔或微孔内的充填物经溶蚀带走而形成的孔隙(图2c),晶体本身未受溶蚀或溶蚀不明显。晶间溶孔主要发育在粉晶白云岩中,与晶粒大小有密切关系。此类孔隙连通性较好,具较高的孔隙度,研究区奥陶系风化壳各层段都比较发育,是该风化壳储层的主要储集空间。

**膏溶孔** 这是由地下水将白云岩中的石膏晶体或结核溶解所形成的孔隙(图2f),有些膏溶孔经溶蚀扩大可形成溶洞。膏溶孔在研究区马五<sub>1</sub>—马五<sub>2</sub>亚

段最为发育,但充填比较严重,可以被白云石、方解石、石英以及地开石等矿物充填,其典型的发育特征可见图3。以大98井为例,其膏溶孔常被地开石充填(图2h),但因此类孔隙较为发育,故对储层仍有一定的建设性作用。

**裂缝** 它既是储集空间,也是良好渗滤通道,研究区裂缝主要有构造缝和溶缝(图2i)两种类型。构造缝在薄片可见切穿方解石脉,且有一定的开启度和未被充填,所以多为有效缝。溶缝属加里东期淡水溶蚀成因,现多被灰泥或云泥充填,也可见淡水方解石充填。

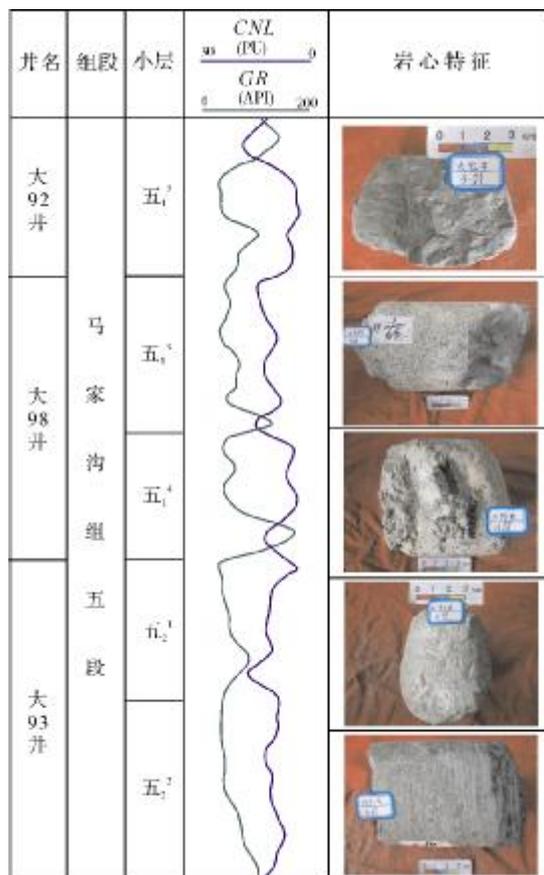


图3 大牛地气田奥陶系风化壳膏溶孔发育的典型井段

### 2.3 储层物性

对研究区 504 个岩心样品的常规物性实测分析表明(见图4):样品孔隙度的分布范围为0.1%~11.1%,主要分布范围小于5%;若以孔隙度大于5%为好,2%~5%之间为较好,小于2%为较差,则孔隙度属于好的有12%,较好的有60%,28%属较差;渗透率的分布范围为 $(0.0048\sim 167)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,主要分布范围为 $(0.01\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;若以渗透率大于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 为好, $(0.03\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间为较好,小于 $0.03\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 为较差,则19%的样品渗透率属好,56%的样品属较好,25%的样品渗透率属于较差。

根据孔隙度、渗透率的分类标准<sup>[13]</sup>,研究区储层为低孔-低渗致密储层。从图5可以看出,研究区孔隙度和渗透率的整体相关性很差,在同一个孔隙度区间内,渗透率可以相差好几个数量级,这与岩石孔隙类型多样性有关。

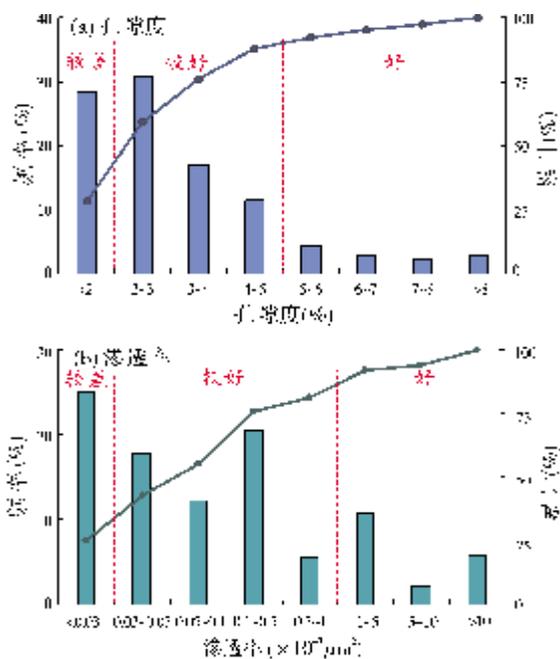


图4 大牛地气田奥陶系风化壳储层孔隙度与渗透率分布频率

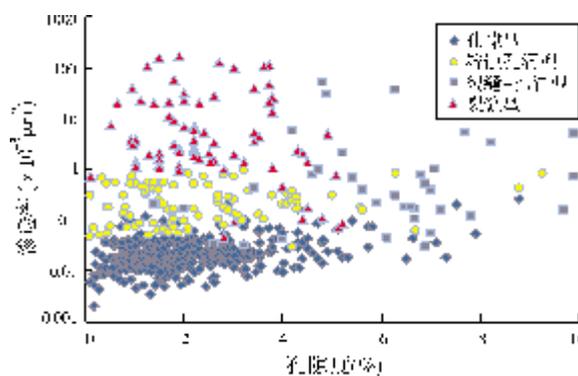


图5 大牛地气田奥陶系风化壳储层孔隙度与渗透率的相关性

研究区的储集空间类型主要有孔隙型、溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型以及裂缝型。对所有样品的孔-渗相关性分析表明(图5):孔隙型样品的孔隙度主要分布在1%~5%之间,渗透率在 $0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 以下;溶蚀孔洞型样品与孔隙型样品相比,两者孔隙度接近,但渗透率较孔隙型要高很多,基本上差一个数量级,这种现象可能是由于石膏溶解形成的微裂缝改善了孔隙喉道,使渗透率明显增大,而孔隙度却变化不大;裂缝-孔洞型储层样品的孔隙度多在4%以上,渗透率较大,多数在 $0.05\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 以上;裂缝型储层样品的渗

透率多在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,最大可达 $167 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,而孔隙度主要分布在0.1%~4%之间,相对其他几种类型偏低,说明裂缝对渗透率的影响明显,而对孔隙度的影响则相对较弱。

综上所述表明,研究区几种不同的储集体类型有不同的孔渗关系,储集类型的多样性造成了储集体整体上孔隙度和渗透率的相关性很差。

### 3 不同类型储层的特征

上面已有述及,根据储集空间特征可将研究区奥陶系马家沟组风化壳储层划分为孔隙型、溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型以及裂缝型四种,下面对它们的相关特征分别进行描述。

#### 3.1 孔隙型储层

储集空间以各类孔隙为主,裂缝不发育,主要为晶间孔、晶间溶孔及晶间微孔,岩石类型主要为粉晶白云岩和微晶白云岩。这类储层的物性较好,孔隙度主要在1%~5%之间,渗透率主要在 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,不过这类储层的分布范围最广,因此它们仍是本研究的主要储集类型。

典型的井段如大11井(图6a),井深2872.0~2875.6m,深浅双测向、密度以及自然伽马均为低值,声波值较高,声波、密度以及自然电位都显示无明显孔、洞、缝特征。电阻率 $180 \Omega \cdot \text{m}$ ,密度 $2.60 \text{ g/cm}^3$ ,自然伽马30 API,声波 $170 \mu\text{s/ft}$ ,自然电位无明显变化,为典型的孔隙型储层特征。

#### 3.2 溶蚀孔洞型储层

储集空间以溶蚀孔洞为主,大多数被方解石充填,主要发育在(含)膏质白云岩中,少量存在于次生石灰岩中。这类储层的物性好,孔隙度最大可达9%,渗透率在 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,主要发育在风化壳的顶部,是所研究地层的重要储集类型。

溶蚀孔洞型储层的测井特征与孔隙型的较为相似,测井曲线无明显的裂缝和溶蚀孔洞特征,深浅双测向、密度以及自然伽马均为低值,声波值高。典型的井段如大13井(图6b),井深2850.0~2854.0m,声波、密度以及自然电位都显示无明显孔、洞、缝特征。电阻率 $180 \Omega \cdot \text{m}$ ,密度 $2.50 \text{ g/cm}^3$ ,自然伽马25 API,声波最大可达 $200 \mu\text{s/ft}$ ,自然电位无明显变化,为典型的溶蚀孔洞型储层特征。

#### 3.3 裂缝-孔洞型储层

这是几种储集空间相组合的储层类型,这类储层中溶蚀孔洞较发育,同时发育裂缝,裂缝多为溶蚀缝及微裂缝,裂缝的存在使储层物性有明显改善。这类储层的物性有孔隙度中一高、渗透率较高的特点,孔隙度多在4%以上,渗透率最高可达 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

裂缝-孔洞型储层的测井特征为深浅双侧向值较低,密度、自然伽马呈低值,声波值高。典型井段如大15井(图6c),井深2929.9~2933.0m,深浅双侧向为低值,电阻率 $450 \Omega \cdot \text{m}$ ,密度 $2.50 \text{ g/cm}^3$ ,自然伽马20 API,声波 $230 \mu\text{s/ft}$ ,自然电位呈下降趋势,为典型的裂缝-孔洞型储层特征。

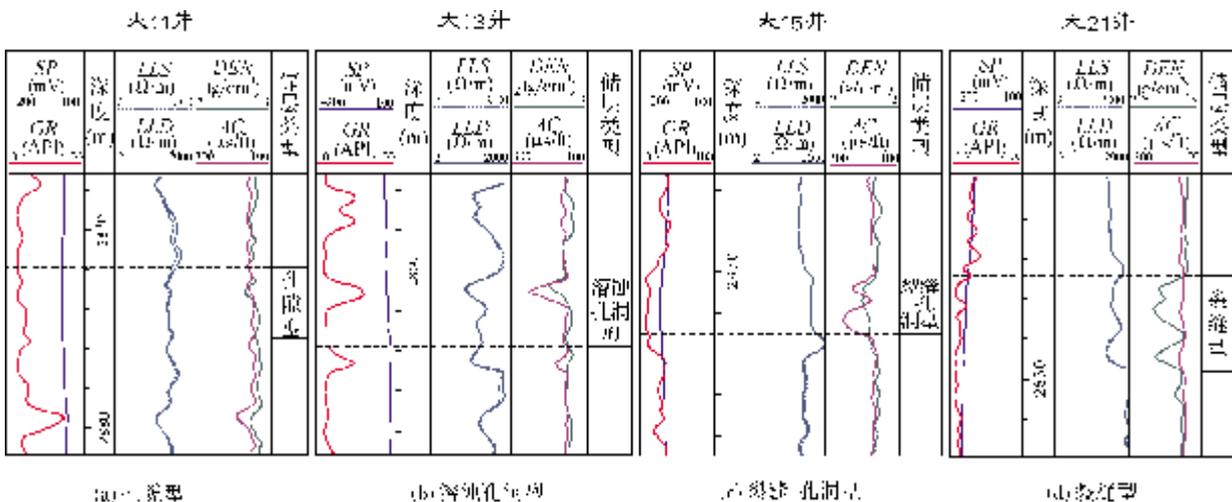


图6 大牛地气田奥陶系马家沟组风化壳不同类型储层的测井响应特征

### 3.4 裂缝型储层

这类储层的储集空间以裂缝为主,孔洞不发育。研究区多为高角度缝及网状缝,大部分为溶蚀缝,偶见构造缝,且裂缝大部分被充填。该类储层在研究区分布较少,其物性表现为高渗透率,最高可达到 $160 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,低孔隙度,多在3%以下。这类储层大部分发育在致密灰岩中,其储集物性较差。

裂缝型储层中裂缝充填严重,测井响应较弱,深浅双侧向、密度、声波以及自然伽马一般呈齿状。典型

的井段,如大21井(图6d),井深2824.8~2829.6 m,电阻率 $400 \Omega \cdot \text{m}$ ,密度 $2.30 \text{ g/cm}^3$ ,自然伽马35 API,声波 $170 \mu\text{s/ft}$ ,自然电位有明显下降,深浅双侧向及自然伽马较低,声波和密度为齿状,呈明显的裂缝型储层特征。

## 4 储层分布特征

### 4.1 储层的纵向分布

储集空间或储层的分布受控于沉积环境和成岩作用,不同的成岩环境及其演化也造成了研究区各储层类型的差异(图7)。

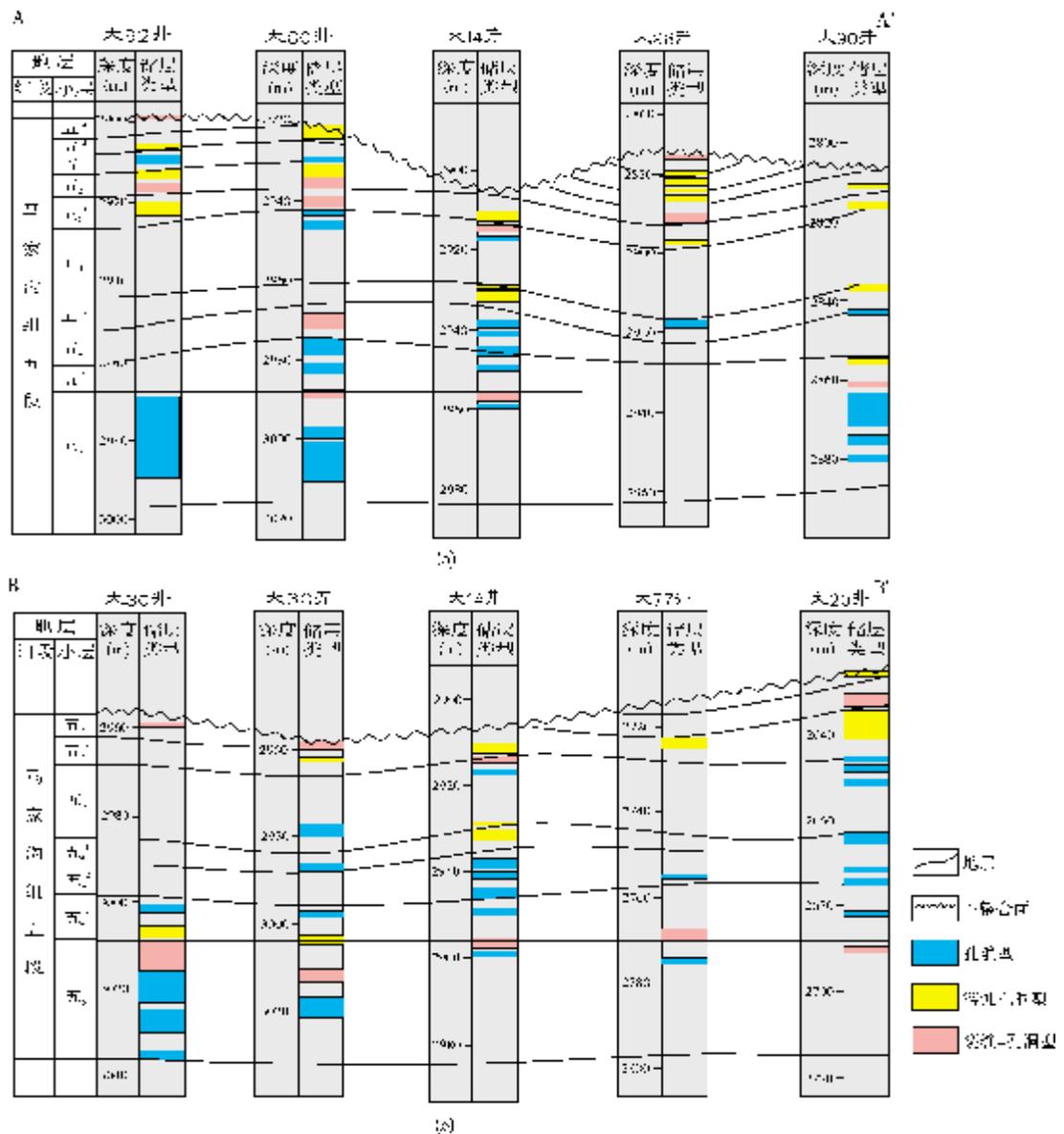


图7 大牛地气田奥陶系马家沟组风化壳储层类型纵向分布特征

A—A', B—B'剖面位置见图1

由于研究区储层的渗透率极低(渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占总样品的80%),且实测的难度很大,因此在研究区以孔隙度大于2%为标准划分了各类储层的有效厚度。

孔隙型储层是研究区最主要的储集体类型,在马五<sub>1</sub>—马五<sub>5</sub>亚段均有发育。其中:马五<sub>1</sub>—马五<sub>4</sub>亚段中孔隙型储层的有效厚度较薄,单层有效厚度为1~2m,最大为4m(图7a,大60井,马五<sub>4</sub>);马五<sub>5</sub>亚段中的孔隙型储层的有效厚度相对较厚,单层有效厚度一般2~8m,最大可达20m(图7a,大92井,马五<sub>5</sub>)。

溶蚀孔洞型储层在风化壳顶部马五<sub>2</sub>以上地层中发育相对较多,受古岩溶作用的影响明显,其分布规模也受岩溶残丘或高地的形状和落差大小控制。从图7中也可以看出,马五<sub>2</sub>以上地层溶蚀孔洞型储层相对较发育。

裂缝-孔洞型储层在研究区马五<sub>1</sub>—马五<sub>5</sub>亚段中均有发育,但这类储层是由多种储集空间组合的

一类储层,其分布与裂缝、溶蚀孔洞的分布位置相关,整体上不太发育。

裂缝型储层在研究区不太发育,这类储层物性表现为渗透率高而孔隙度低,且裂缝的充填较为严重而使连通性变差,储集价值不大,多为非储层。由于图7中显示的储层为孔隙度大于2%的有效储层,而裂缝型储层的孔隙度普遍偏低,因此在图中显示不出。

## 4.2 有利储层的平面分布

从图7a、7b可以看出,研究区风化壳储层在马五段各小层分布不均,其中有利储层最为发育的是马五<sub>2</sub>和马五<sub>5</sub>亚段,其次为马五<sub>4</sub>和马五<sub>1</sub>亚段,再次为马五<sub>3</sub>亚段。本文以马五<sub>2</sub>亚段为例,主要依据储层的有效厚度并结合井位分布,对马五<sub>2</sub>亚段有效储层平面分布做了一定预测(图8),图中预测了5个有利区(I区—V区)。

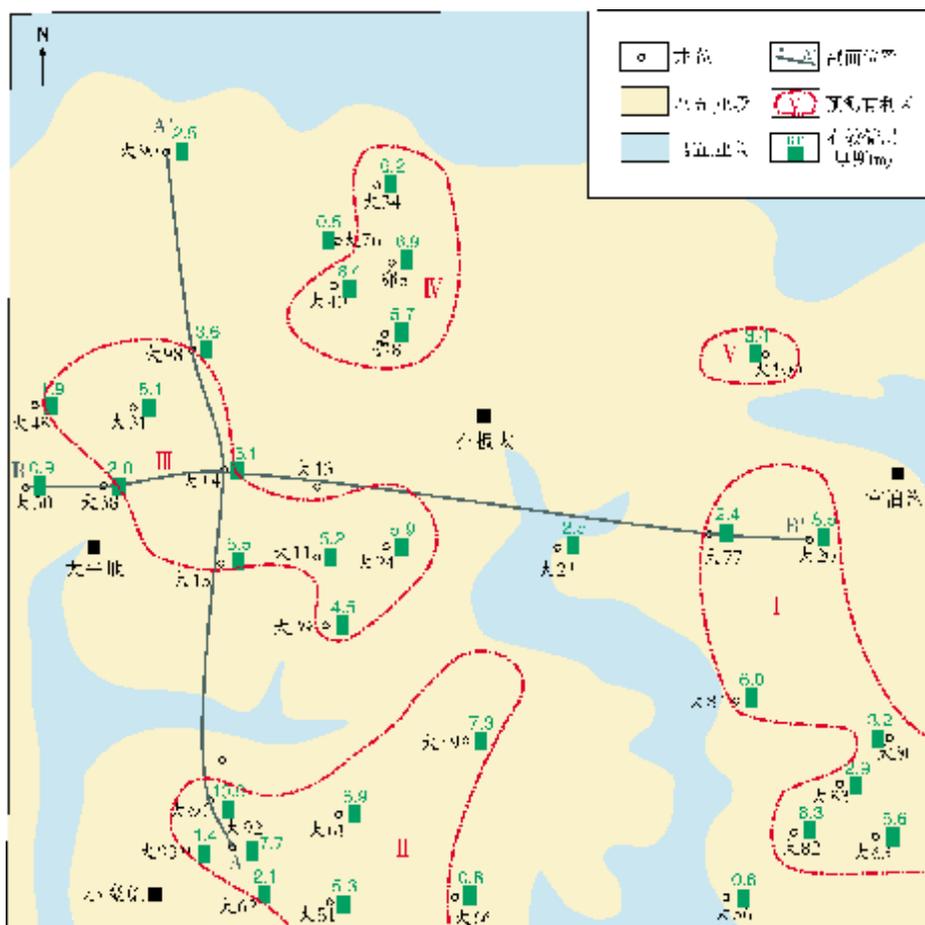


图8 大牛地气田奥陶系马家沟组马五<sub>2</sub>亚段有利储层预测分布图

## 5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系马家沟组风化壳储层主要发育在马家沟组的五段, 整体具有低孔低渗的特征, 孔隙度在5%以下, 渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。

(2) 研究区风化壳储层储集空间以次生孔隙为主, 按照储集空间类型及组合特征可将储层分为孔隙型、溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型和裂缝型四种, 其中有利储层类型以孔隙型为主, 裂缝型储层最差。

(3) 在纵向上, 马家沟组风化壳储集体的主要发育层段分布在马五<sub>1</sub>、马五<sub>2</sub>、马五<sub>4</sub>和马五<sub>5</sub>亚段, 其中马五<sub>2</sub>和马五<sub>5</sub>亚段中最为发育, 马五<sub>4</sub>和马五<sub>1</sub>亚段次之; 平面上, 马五<sub>2</sub>亚段的有利预测区域主要在I区、II区、III区, 其次为IV区和V区。

### 参考文献

- [1] 冉新权, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系顶部形成演化与储集层发育[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2):154-162.
- [2] 惠宽洋, 贾会冲. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区下古生界奥陶系天然气的气源追踪研究[J]. 矿物岩石, 2001, 21(1):23-27.
- [3] 袁志祥. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系风化壳岩溶地震相特征与天然气勘探[J]. 天然气工业, 2001, 21(3):1-6.
- [4] 袁志祥. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系风化壳岩溶相特征[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(3): 279-284.
- [5] 孟祥豪, 张哨楠, 丁晓琪. 鄂北塔巴庙地区奥陶系风化壳岩溶地貌研究[J]. 中国西部油气地质, 2005, 12(1/2):173-176.
- [6] 苏中堂, 陈洪德, 林良彪, 等. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系古岩溶发育特征及储层意义[J]. 新疆地质, 2010, 28(2):180-185.
- [7] 马振芳. 鄂尔多斯盆地中部古风化壳储层特征[J]. 天然气地球科学, 1994, 26(5):28-36.
- [8] 王雪莲, 王长陆, 陈振林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层研究[J]. 特种油气藏, 2005, 12(3):32-36.
- [9] 孟祥豪, 张哨楠, 李连波, 等. 鄂尔多斯北部塔巴庙地区奥陶系风化壳储渗体特征及分布[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2006, 33(3):233-239.
- [10] 赵淑平, 王起琼. 鄂尔多斯盆地大牛地气田马家沟组古岩溶储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2): 170-175.
- [11] 王建民. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶古地貌与储层特征[D]. 西北大学, 2011.
- [12] 陈胜, 张哨楠, 邓礼正, 等. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系古岩溶研究[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(3):239-245.
- [13] 何生, 叶加仁, 徐思煌. 石油及天然气地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2010: 64-66.

编辑:吴厚松, 金顺爱

## Characteristics and Distribution of Ordovician Weathering Crust Reservoirs in Daniudi Gas Field, Ordos Basin

Liu Mei, Ding Xiaoqi, Wan Youli, Bai Xiaoliang, Chen Qianqian, Le Jinpeng

**Abstract:** Abundant petroleum resources are present in Ordovician Majiagou weathering-crust reservoirs in Daniudi Gas Field, Ordos Basin. Based on the analysis of core observation, thin section identification, reservoir property characters and logging data from the reservoirs, it is indicated that Majiagou reservoirs belong to tight ones with low porosity and low permeability. The reservoirs can be classified into the dissolved porosity reservoirs (in majority), the dissolved and fractured/vuggy ones and the fractured ones (in minority) in turn. In longitudinal, developing reservoir beds are Majiagou Ma<sub>1</sub>, Ma<sub>2</sub>, Ma<sub>4</sub> and Ma<sub>5</sub> members. Good reservoirs that distribute in plane are predicted for further exploration targets.

**Key words:** Ordovician; Majiagou Fm.; Weathering-crust reservoir; Reservoir characteristics; Reservoir prediction; Daniudi Gas field; Ordos Basin

Liu Mei; female, Master degree in progress at Energy College of Chengdu University of Technology. Add: 1 Dongsan Rd., Erxianqiao, Chengdu, Sichuan, 610059, China