

文章编号: 1009-3850(2013)01-0079-07

靖边潜台北部奥陶系风化壳储层研究

李杰¹, 张振文¹, 刘顺治², 冷丹凤³, 张道峰⁴, 何亚宁¹, 吕利刚¹

(1. 长庆油田分公司第一采气厂, 陕西 榆林 718500; 2. 延长石油集团油气勘探公司, 陕西 延安 716000; 3. 延长油田勘探开发技术研究中心, 陕西 延安 716000; 4. 长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 根据靖边气田、乌审旗气田以往的勘探经验, 岩溶作用改造的白云岩储层是制约下古生界天然气勘探成功率的关键。本文在大量岩心、薄片观察的基础上, 对研究区风化壳储层类型与发育特征进行了分析。结果表明: 潜台北部马五₄、马五₅ 不同种类的白云岩储层的储集类型有别, 主要为裂缝-溶孔(洞)型、裂缝-孔隙型及孔隙型等。岩溶台地马五₄、马五₅ 白云岩储层剥露, 上古生界煤系烃源岩成为白云岩储集体成藏的直接有效的气源; 岩溶斜坡带发育的沟槽一般深切马家沟组顶面, 有利于地表水岩溶作用的进行, 使得马五₄ 有利储层大多沿沟槽展布。白云岩化及岩溶作用是形成该地区隐蔽的岩性及地层-岩性复合圈闭气藏的关键, 在今后勘探过程中马五段中、下部地层仍将是该地区工作重点。

关键词: 风化壳储层; 储层类型; 奥陶系; 靖边潜台; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

引言

靖边潜台位于鄂尔多斯盆地一级构造单元伊陕斜坡中部, 是靖边气田所处的主要构造位置, 其东侧为米脂-延川古凹陷, 西南侧为盐池-庆阳-黄陵“L”型的古隆起(又称中央古隆起), 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^[1](图1)。

研究区下古生界气藏主要分布于马家沟组顶部碳酸盐岩风化壳储层中, 为马五₄、马五₅ 亚段沉积。截止2011年底, 该区马五₄ 气藏已提交控制储量 $440.39 \times 10^8 \text{ m}^3$, 预测储量 $543.25 \times 10^8 \text{ m}^3$; 马五₅ 白云岩储集体多呈透镜状分布^[3], 规模较小。1996年在该区钻探的陕196井发现马五₅ 白云岩晶间孔型含气层, 试气无阻流量 $11.3569 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。但随后追踪钻探的陕197、198、199等井均未取得好效

果^[4], 目前仅在该区勾画出6个有利的白云岩储集透镜体, 气藏储量有待进一步落实(图2)。

根据靖边气田、乌审旗气田以往的勘探经验, 岩溶作用改造的白云岩储层是制约下古生界天然气勘探成功率的关键, 因此对白云岩储层成因方面的认识有待深入研究。本文在大量岩心、薄片观察的基础上, 对风化壳储层类型与发育特征进行了分析, 有利于形成潜台北部成藏有利区带的新认识, 奠定马家沟组气藏规模勘探发现的基础。

1 储层特征

1.1 岩石类型

探井岩心资料反映的马五₄ 主要岩石类型为含硬石膏结核和/或柱状晶残余溶模孔隙的细粉晶白云岩以及质较纯的细粉晶白云岩(图版I a, b, c), 硬石膏结核呈韵律性发育, 柱状晶呈层发育, 且均已

收稿日期: 2012-10-19; 改回日期: 2012-10-29

作者简介: 李杰(1986-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事石油与天然气开发地质研究工作。E-mail: lijie610852@163.com

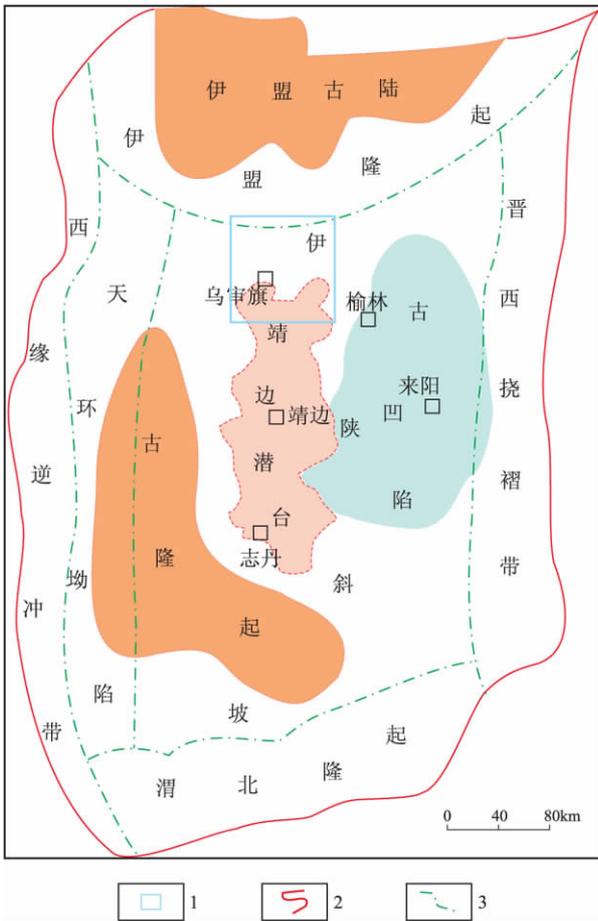


图1 鄂尔多斯盆地靖边潜台及周边构造分布(据侯方浩等^[2]修改)

1. 研究区; 2. 盆地边界; 3. 构造单元界限

Fig.1 Tectonic division within and around the Jingbian buried platform in the Ordos Basin (modified from Hou Fanghao et al., 2002)

1 = extent of the study area; 2 = basin boundary; 3 = tectonic boundary

大部分溶蚀; 马五₅ 上部主要为细粉晶白云岩(图版 I d) 以及豹斑白云岩, 下部为灰岩段。

1.2 储集类型

在含硬石膏结核和/或柱状晶的细粉晶白云岩中, 结核呈韵律性分布、柱状晶体呈层状分布且含量不均, 结核含量约 10% ~ 30%, 柱状晶体含量为 1% ~ 10%。经过漫长的成岩改造过程, 绝大部分硬石膏结核、柱状晶已变成溶模孔隙。但在后期的成岩改造过程中, 又接受了多期成岩矿物的沉淀、充填, 包括岩溶水带来的以物理方式沉淀的白云石晶屑或粉砂和以化学方式沉积的方解石、白云石、自生石英、黄铁矿、石膏等。根据溶孔及裂缝发育情况可将研究区风化壳储层储集类型划分为以下 3 种(方少仙等, 长庆油田内部资料 2006):

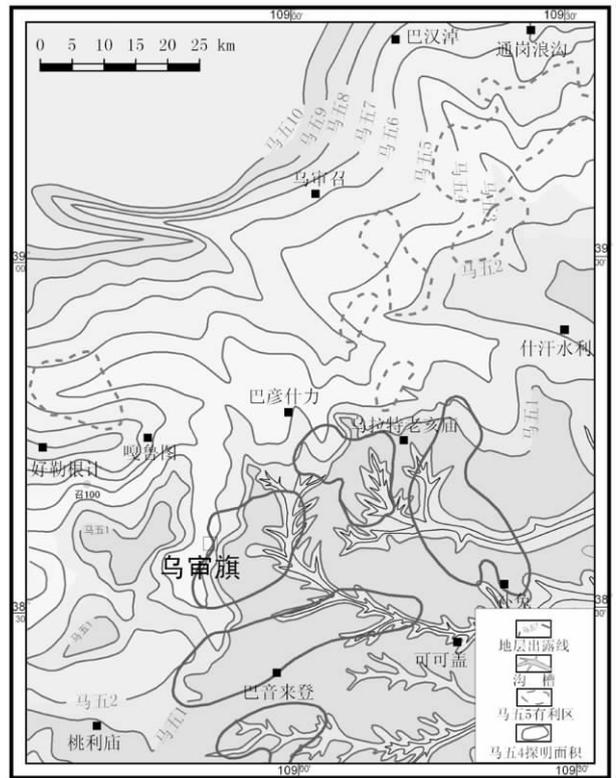


图2 靖边潜台北部马家沟组地层出露图

Fig.2 Geological map of northern Jingbian buried platform in the Ordos Basin

(1) 裂缝-溶孔(洞)型。主要发育于马五₄ 含硬石膏结核和/或柱状晶的细粉晶白云岩及其局部受改造形成的细角砾屑白云岩中, 微裂缝发育(图版 I a b c e h)。

(2) 裂缝-孔隙型。主要发育于马五₄ 细粉晶白云岩中, 其次在含硬石膏结核溶模孔的细角砾屑白云岩、细粉晶白云岩及部分中-粗晶屑白云岩、粉晶屑白云岩等岩类中微裂缝发育(图版 I b e)。

(3) 孔隙型储层。主要发育于马五₄、马五₅ 细粉晶白云岩中, 是马五₅ 主要的储集类型。储层岩石类型与裂缝-孔隙型储层相似, 只是微裂缝发育程度较差(图版 I g)。

另外, 根据目前已掌握的岩心观察资料, 单纯的裂缝型储层在本区马五₄、马五₅ 白云岩储层中较少见, 其主要发育于马五₅ 灰岩段。

1.3 储层物性特征

统计研究区 104 口井马五₄、马五₅ 岩心样品的 217 个孔隙度、163 个渗透率数据得出, 马五₄ 储层孔隙度为(0.1 ~ 16.8)%, 平均 3.39%; 渗透率为(0.002 ~ 103.71) × 10⁻³ μm², 平均 1.727 × 10⁻³ μm²。马五₅ 储层段孔隙度为(0.11 ~ 15.32)%, 平均 2.03%; 渗透率为(0.003 ~ 53.06) × 10⁻³ μm², 平均

表 1 研究区马五₄、马五₅ 岩心样品孔隙度、渗透率统计Table 1 Statistics of the porosity and permeability of the core samples from the Ma-5₄ and Ma-5₅ reservoirs

层位	名称	最小值	最大值	均值	10%	25%	50%	75%	90%	标准偏差	样品数(块)
马五 ₄	孔隙度(%)	0.1	16.8	3.39	0.48	0.91	2.44	5.26	7.74	2.99	148
	渗透率(10 ⁻³ μm ²)	0.002	103.71	1.727	0.006	0.018	0.101	0.636	2.756	7.44	122
马五 ₅	孔隙度(%)	0.11	15.32	2.03	0.21	0.32	0.64	1.6	5.84	3.43	69
	渗透率(10 ⁻³ μm ²)	0.003	53.06	0.735	0.004	0.007	0.015	0.201	1.736	4.19	41

0.735 × 10⁻³ μm² 物性相对较好(表 1)。

1.4 稳定碳、氧同位素与成岩作用

靖边潜台北部地区马家沟组马五₄、马五₅ 白云岩、石灰岩的碳、氧同位素组成测试分析结果见表 2。其中 Z 值为盐度指数,根据 Keith 和 Weber (1964) 推导的公式计算得出:

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$$

(δ 的标准为 PDB)

其中,Z 值大于 120 的碳酸盐岩为海水(同生期)成岩环境;Z 值接近 120 为埋藏混合水成岩环境;Z 值小于 120 为大气淡水成岩环境^[5]。

另外,碳酸盐岩稳定碳、氧同位素值还需与海水的碳、氧同位素进行对比。地质历史中奥陶纪海水的稳定同位素值约为 δ¹⁸O = -6.5‰ ~ -4.5‰、δ¹³C = -2.0‰ ~ -0.5‰^[6]。研究区碳酸盐岩 δ¹⁸O 值(-13.93‰ ~ -6.13‰)比奥陶纪海水值偏负,引起这种差异的原因可归结为“温度效应”、“淡水效应”^[7],即埋藏(高温)环境和大气淡水环境影响。基质岩与溶孔充填的碳酸盐岩 δ¹⁸O 值相近,说明成岩流体属同一流体源;δ¹³C 值(-6.19‰ ~ 1.15‰)与奥陶纪海水值基本相近,说明成岩地层流体没有受到有机碳的影响^[7]。而其中 11、20 号样品可能产于较淡化水体,故碳同位素值偏低(表 2、图 4)。

从上述不同岩石类型的 δ¹³C、δ¹⁸O 值特征来看,马五₄、马五₅ 岩溶储层形成过程受到不同环境的影响。大气降水溶蚀强度的加大,δ¹³C 向低、中负值方向偏移,δ¹⁸O 发生强烈的负偏移,岩溶发育,储集性能变好^[5]。

2 岩溶储层发育特征

鄂尔多斯盆地马家沟组储层在加里东运动中抬升经历的古岩溶作用,是盆地下古储层发育的重

要因素之一,也是成就大气田主要因素之一。

2.1 岩溶作用影响储层发育程度

根据地震和钻井资料勾绘的奥陶纪古地质图(图 2),反映出研究区马家沟组地层剥露层位由西北向东南方向依次由老变新。根据岩心观察、测井解释残余石膏层顶部发育层位情况,该区风化壳发育深度普遍达到马五₄¹ 以下,岩溶储层相对发育。在重力作用下,沿马五₄ 地层裂缝、层理面等(图版 I c d) 下渗的未饱和岩溶水可继续改造马五₅ 白云岩储层,提高白云岩储集物性。

岩心观察中发现马五₄ 地层顶部部分地层已成为塌积角砾岩,其中较为常见的角砾屑为粉晶白云岩以及含硬石膏结核的粉晶白云岩(图版 I e)。这表明,作为有利储层的岩性已遭溶塌,有的又被地下径流带至异地沉积,角砾间大多数是由含泥质或含炭泥质的细碎屑充填,无疑对储层起着极大的破坏作用。

马五₄ 地层中含硬石膏结核粉晶白云岩的结核溶模孔中,早期半充填细粉晶自形亮晶白云石后又被石英、方解石交代充填剩余空间^[8]。早期形成的微裂隙也同样遭此破坏,在一定程度上抑制了后期埋藏溶解作用孔隙的发育(图版 I f h j)。

2.2 岩溶古地貌影响气藏成藏

潜台北部岩溶高地大致呈北东方向展布,沿桃利庙-乌审旗-乌拉特老亥庙-什汗水利一线以北分布(图 2)。地势整体较高,总体向东南倾斜,属强溶蚀区,以侵蚀、溶蚀为主(图版 I e f),发育块状岩溶,沟槽对地层破坏严重,垮塌堆积现象明显,岩溶储层在不同层位均有发育。该线以北是马五₄、马五₅ 白云岩储层剥露区,发育较好的上古生界煤系烃源岩与白云岩储层直接接触,可作为白云岩储集体成藏的有效气源^[4]。

表2 靖边潜台北部奥陶系马五₄、马五₅ 碳酸盐岩碳氧同位素组成

Table 2 Carbon and oxygen isotopic compositions in the carbonate rocks from the Ma-5₄ and Ma-5₅ reservoirs

序号	井号	层位	岩性	样品类型	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	Z 值
					(‰) PDB	(‰) PDB	
1	苏2	马五 ₄ ²	泥晶云岩	基质岩	-6.13	0.14	125
2	苏4	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-7.56	0.7	125
3	苏7	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-8.07	-0.6	122
4	苏8	马五 ₄ ²	细粉晶云岩	基质岩	-8.47	-0.26	123
5	苏15	马五 ₄ ³	泥晶灰岩	基质岩	-10.47	-3.09	116
6	苏31	马五 ₄	泥晶角砾云石	基质岩	-7.14	-0.29	123
7	苏32	马五 ₅	泥粉晶云岩	基质岩	-8.34	-1.27	121
8	召2	马五 ₄ ¹	嵌晶状方解石	溶孔充填物	-6.98	-1.26	121
9	召3	马五 ₄ ¹	泥晶云岩	基质岩	-13.93	-3.89	112
10	召4	马五 ₄ ³	嵌晶状白云石	溶孔充填物	-7.77	-0.06	123
11	召11	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-10.88	-5.58	110
12	召15	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-8.29	-0.53	122
13	召18	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-9.44	-0.86	121
14	召18	马五 ₅	含灰云岩	基质岩	-8.38	-0.32	122
15	召42	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-8.03	0.02	123
16	召44	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-8.56	-0.03	123
17	召44	马五 ₄ ²	泥晶灰岩	基质岩	-10.41	-1.70	119
18	桃5	马五 ₄ ²	泥晶云岩	基质岩	-8.17	-1.12	121
19	统15	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-8.45	0.41	124
20	统15	马五 ₄ ¹	泥晶云岩	基质岩	-9.14	-6.19	110
21	统23	马五 ₄ ²	细粉晶云岩	基质岩	-9.84	-1.96	118
22	陕118	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-8.50	0.47	124
23	陕189	马五 ₄ ¹	细粉晶云岩	基质岩	-8.11	0.85	125
24	陕198	马五 ₄ ²	细粉晶云岩	基质岩	-7.16	-0.28	123
25	陕198	马五 ₄ ³	细粉晶云岩	基质岩	-8.30	1.15	126

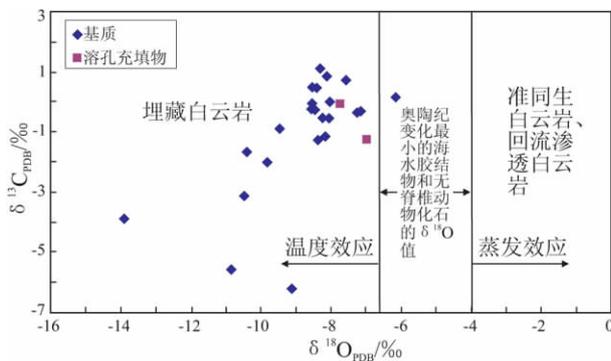


图3 靖边潜台北部马五₄、马五₅ 碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ -Z 值与岩溶环境关系

Fig. 3 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ -Z values and karst conditions in the carbonate rocks from the Ma-5₄ and Ma-5₅ reservoirs

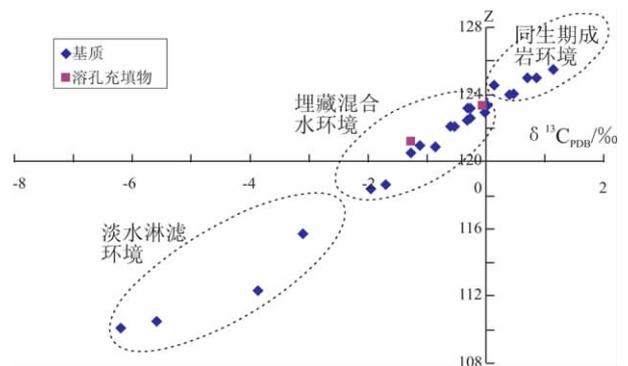


图4 靖边潜台北部马五₄、马五₅ 碳酸盐岩与奥陶纪海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比图

Fig. 4 Comparison of the $\delta^{18}\text{O}$ values for the Ordovician seawater and the carbonate rocks from the Ma-5₄ and Ma-5₅ reservoirs

岩溶斜坡位于岩溶台地南东的广大地区,以发育水平潜流岩溶带为特色。水平潜流为岩溶高地带补给的未饱和渗流岩溶水经汇集而成,其溶蚀、侵蚀能力强,从而形成较大规模的溶蚀孔洞储集体(图版 I c, h),为气藏的形成提供了有利储集空间。

岩溶斜坡带对马家沟组气藏影响最大的岩溶地貌类型是沟槽(图2)。沟槽一般深切马家沟组顶面,马五₄地层以上马家沟组残余厚度越小,越有利于地表水向下渗流,有利于岩溶作用的进行。马五₄有利储层主要发育在残余厚度值在0~44m的范围内,大多沿沟槽展布(图2)。

3 天然气成藏储层条件

3.1 白云岩储层储集性能

潜台北部风化壳储层岩石类型主要为白云岩,其中普遍发育的孔、洞等储集空间是气田形成的重要条件。

(1) 白云石化可以增加储集空间

白云岩化(或白云石化)过程中,离子半径较小的 Mg^{2+} 置换了方解石晶格中离子半径较大的 Ca^{2+} ,而使新生白云石晶体的晶形变好、体积相对方解石缩小(图版 I g)。理论上,由方解石转化为白云石的过程可缩小的体积最多可达14.81%(实际10%~12%),由此而产生的规则多面体晶间孔使岩石的孔隙度增大^[9]。

(2) 岩溶作用可以改善储层物性

潜台北部白云岩储层中普遍发育的硬石膏结核和/或柱状晶残余溶模孔隙是表生期和埋藏期岩溶水作用的结果(图版 I a, b, e)。埋藏期的溶蚀作用对古岩溶储层的定型起到了重要作用^[10]。另外,岩溶作用也可改造白云岩储层晶间孔(图版 I f, i)及其它选择性及非选择性的孔隙(如石盐等)。但是其造孔规模及孔渗性都不如改造含硬石膏结核和/或柱状晶的白云岩好^[11]。

3.2 古地貌条件有利于形成岩性、地层-岩性圈闭

潜台北部奥陶系古风化壳气藏主要为受岩溶作用影响的岩性、地层-岩性圈闭型气藏。气藏的盖层是石炭系铝土质泥岩,底部隔层是马五₅泥晶灰岩,东侧上倾方向则为沟槽中充填的石炭系铝土质泥岩和奥陶系致密碳酸盐岩遮挡^[12],以及岩溶作用较弱的致密岩性带,形成隐蔽的岩性及地层-岩性复合圈闭气藏(图5)。

这类圈闭是已探明的盆地下古生界气藏,特别

是潜台北部地区的主要圈闭类型,具有有效容积大、分布规律强等特点。其成因是由于未饱和的水平潜流从补给区向排泄区流动的同时,对碳酸盐岩地层中的易溶蚀岩层产生溶蚀,而且水平段越长,岩溶影响的地层深度越深。如埋藏较深马五₅地层,尽管主要为黑色泥晶灰岩,但在上部的马五₅¹局部也有透镜状白云岩体,它们经过溶蚀改造,物性得到了提高,成为较好的储集体^[13]。研究区位于岩溶斜坡部位的陕198井、陕196井及神5井等马五₅¹白云岩透镜体气藏就是很好的例证(图5)。

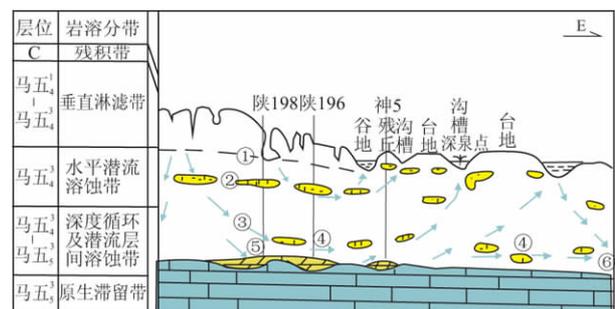


图5 靖边潜台北部岩溶作用形成的岩性、地层-岩性圈闭模式图(据拜文华等^[13]修改)

①地下水面;②潜流带孔洞层;③地下水流线;④深度溶蚀带;⑤马五₅¹白云岩透镜体;⑥向东部更低的斜坡泄水

Fig. 5 Model for the formation of the concealed lithologic and stratigraphic-lithologic traps caused by the karstification developed on the northern Jingbian buried platform in the Ordos Basin (modified from Bai Wenhua et al., 2002)

① = underground water table; ② = porous horizons in the phreatic zone; ③ = flow direction of the underground water; ④ = deep-seated solution zone; ⑤ = Ma-5₅¹ dolostone lens; ⑥ = eastward discharge

4 结论

(1) 靖边潜台北部主要岩类为含硬石膏结核和/或柱状晶残余溶模孔隙的细粉晶白云岩和细粉晶白云岩,储集类型有裂缝-溶孔(洞)型、裂缝-孔隙型及孔隙型等。

(2) 上古生界煤系烃源岩与马五₄、马五₅白云岩储层剥露区直接接触,是天然气成藏的有效气源;被沟槽深切的马家沟组顶面,有利于地表水岩溶作用的进行,马五₄气藏就大多沿沟槽展布。

(3) 白云岩化及岩溶作用是形成该地区隐蔽的岩性及地层-岩性复合圈闭气藏的关键,在今后勘探过程中马五段中、下部地层仍将是该地区工作重点。

参考文献:

- [1] 乔琳, 沈昭国, 方少仙, 等. 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五₁₋₄ 亚段储层非均质性主要控制因素[J]. 海相油气地质, 2007, 12(1): 12-20.
- [2] 侯方浩, 方少仙, 赵敬松, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式[J]. 海相油气地质, 2002, 7(1): 38-46.
- [3] 陈志远, 马振芳, 张锦泉. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五₅ 亚段白云岩成因[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(6): 20-22.
- [4] 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]. 地质与勘探, 2011, 31(12): 1-10.
- [5] 许效松, 杜佰伟. 碳酸盐岩地区古风化壳岩溶储层[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 25(3): 1-7.
- [6] 姚泾利, 王保全, 王一, 等. 鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 381-389.
- [7] 赵卫卫, 王宝清. 鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. 地球科学, 2011, 32(6): 681-690.
- [8] 李世临, 雷卞军, 张文济, 等. 靖边气田东北部马五₁ 亚段主要成岩作用研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(1): 22-26.
- [9] 胡见义, 吴因业, 张静. 高海拔与超深地层石油地质若干问题[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 159-167.
- [10] 李振宏, 胡健民. 鄂尔多斯盆地奥陶系孔洞充填特征分析[J]. 地质评论, 2011, 57(3): 444-456.
- [11] 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.
- [12] 戴金星, 王庭斌, 宋岩, 等. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 1997, 81-100.
- [13] 拜文华, 吕锡敏, 李小军, 等. 古岩溶盆地岩溶作用模式及古地貌精细刻画—以鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳为例[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 292-298.

Ordovician karst weathering crust reservoirs on the northern Jingbian buried platform in the Ordos Basin

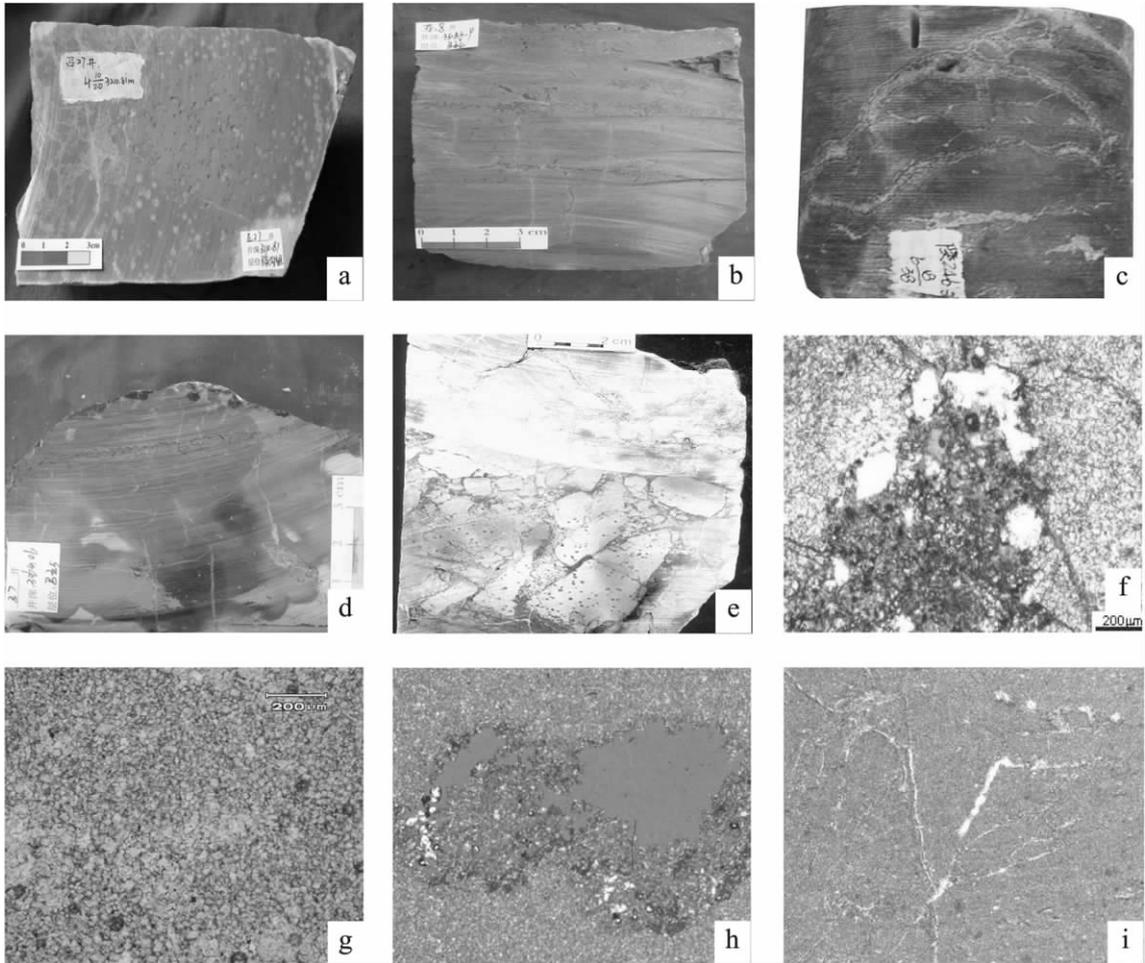
LI Jie¹, ZHANG Zhen-wen¹, LIU Shun-zhi², LENG Dan-feng³, ZHANG Dao-feng⁴, HE Ya-ning¹, LU Li-gang¹

(1. No. 1 Gas Plant, Changqing Oil Field Company, Yulin 718500, Shaanxi, China; 2. Oil and Gas Exploration Company, Yanchang Petroleum Group, Yan'an 716000, Shaanxi, China; 3. Technological Center for Petroleum Exploration and Development, Yanchang Oil Field, Yan'an 716000, Shaanxi, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oil Field Company, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: Judged from the pre-existing exploration history of the Jingbian and Wushenqi Gas Fields, the key factors for the successful exploration of the Lower Palaeozoic natural gas depend on the dolostone reservoirs modified by karstification. It is apparently important to the refinement of the interpretation of the genesis of the dolostone reservoirs in the study area. The examination of the types and development of the weathering crust reservoirs within the Jingbian buried platform has disclosed that the porosity types in Ma-5₄ and Ma-5₅ strata contain the fissure-solution openings (pore caves) type, fissure-pore space type and pore space type. Because of the exhumation of the Ma-5₄ and Ma-5₅ strata, the source rocks in the Upper Palaeozoic coal measures became direct and effective gas source for the hydrocarbon accumulation in the dolostone reservoirs. The gullies and grooves widespread in the karst slope zone tend to penetrate into the uppermost part of the Majiagou Formation, and thus allow the alignment of the Ma-5₄ reservoirs along these gullies and grooves. The dolomitization and karstification are interpreted to be the key factors for the formation of the concealed lithologic and stratigraphic-lithologic traps. The middle and lower parts of the Ma-5 reservoirs will still be the target horizons in the future exploration.

Key words: weathering crust reservoirs; reservoirs types; Ordovician; Jingbian buried platform; Ordos Basin

图版 I



图版说明: a. 岩心照片: 硬石膏结核溶模孔, 部分被渗流粉砂充填, 召 27 井, 3210.81m, 马五₄¹; b. 岩心照片: 硬石膏板柱状晶成纹层状和星散状分布, 白云石半充填, 苏 8 井, 3483.9m, 马五₄²; c. 岩心照片: 剪切裂隙扩溶缝(沟)中方解石充填, 较宽处有残留小溶洞, 陕 246 井, 3235.05m, 马五₄¹; d. 岩心照片: 细粉晶白云岩中发育的缝合线和微裂缝, 右下角为岩心沿裂缝脱落, 白云石充填, 召 7 井, 3064.06m, 马五₅; e. 岩心照片: 白云质紊乱岩溶角砾岩, 角砾屑中含有溶模孔, 召 11 井, 3254.85m, 马五₄¹; f. 薄片照片: 泥晶白云岩中溶蚀孔、缝发育, 它形半自形细晶白云石和泥晶白云石充填, 苏 11 井, 3498.25m, 马五₅; g. 薄片照片: 晶间孔, 召 18 井, 3297.82m, 马五₅; h. 薄片照片: 溶孔被渗流粉砂充填, 见“示底”构造, 陕 234 井, 3273.89m, 马五₄¹, ×30; i. 薄片照片: 方解石充填的微裂缝和针状溶孔, 陕 234 井, 3277.26m, 马五₄¹。