

文章编号: 1000-0550(1999)03-0390-07

# 鄂尔多斯盆地中部马五<sub>1</sub> 亚段高分辨率层序地层格架中风化成岩模式和储层特征<sup>①</sup>

李儒峰 鲍志东

(石油大学盆地与油藏研究中心 北京昌平 102200)

**摘要** 以层序地层学理论为指导,研究了鄂尔多斯盆地中部奥陶系风化壳储层的层序地层特征,建立了马五<sub>1</sub>亚段的高分辨率层序地层格架,在其内识别出了 4 个准层序;通过建立海平面变化与风化成岩(岩溶)作用的关系模式,从成因上阐明了层间岩溶和后期高级别的风化成岩(岩溶)作用的发生过程和控制因素,揭示了在碳酸盐岩高分辨率层序地层格架中,不同级别的海平面变化周期控制着不同级别的沉积层序和风化成岩(岩溶)作用;分析了准层序与储层物性的关系,认为在鄂尔多斯盆地中部奥陶系风化壳储层中,准层序界面控制着层间岩溶的发育,是影响马五<sub>1</sub>亚段风化壳储层性质的主要因素。

**关键词** 鄂尔多斯盆地 马五<sub>1</sub>亚段 高分辨层序地层 储层 成岩模式

**第一作者简介** 李儒峰 男 1964 年出生 博士 副教授 层序地层学及储层沉积学

**中图分类号** P539.2 **文献标识码** A

## 1 前言

鄂尔多斯盆地中部气田是目前我国已发现的最大的整装气田,其储集层类型为奥陶系古风化壳型,前人对此开展了许多工作<sup>[1-3]</sup>。但是,从整体上看,对鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳储层缺乏层序地层学方面的研究。本文在选择重点井进行岩芯观察描述和测井资料分析的基础之上,吸收前人研究成果,从层序地层学的角度,将研究区奥陶系马家沟组马五<sub>1</sub>亚段风化壳储层纳入高分辨率层序地层<sup>[4]</sup>格架(准层序级)中研究,在此基础上探讨了高分辨率层序地层格架中风化壳的储层特征和成岩模式。

鄂尔多斯盆地中部奥陶系马家沟组为一套碳酸盐岩夹蒸发岩地层。根据马家沟组岩性组合特征将其分为六个大的岩性段,自下而上为马一段至马六段,其中马一、马三、马五以准同生白云岩、膏盐岩和溶塌角砾状白云岩为特征;马二、马四、马六段以泥晶灰岩或颗粒泥晶灰岩为特征,反映了周期性的由开阔台地海向潮上萨巴哈、潮上泻湖及膏盐湖沉积

环境变化<sup>②</sup>。对马五段进行综合研究,结合岩性组合、沉积相序等特征,将马五段进一步划分为 10 个亚段,自上而下为马五<sub>1</sub>至马五<sub>10</sub><sup>③</sup>。马五期为二级海平面升降旋回的海平面下降期,根据层序和准层序的组成特征、界面性质和空间位置等,在马五段识别出 3 种类型准层序组,即进积型准层序组(马五<sub>10</sub>—马五<sub>6</sub>亚段);退积型准层序组(马五<sub>5</sub>);进积型准层序组(马五<sub>4</sub>—马五<sub>1</sub>)<sup>[5]④</sup>。马六段(峰峰组)在盆地中部仅局部残存。

## 2 马五<sub>1</sub>亚段高分辨率层序地层特征

马五<sub>1</sub>亚段准层序的识别和划分的主要依据是:(1)关键界面:包括短期地表暴露面和沉积相(微相)突变面;(2)岩性组合;(3)电性特征;(4)沉积微相;(5)盆地内横向对比。据此,在鄂尔多斯盆地中部马五<sub>1</sub>亚段内识别出 4 个准层序,分别相当于马五<sub>1</sub>—马五<sub>4</sub>层。由于准层序在盆地中部所处沉积部位不同,因此,各个准层序在组成上可能会有差异。

① 石油大学基础研究基金资助。编号 ZX9804

② 谢庆邦等. 陕甘宁盆地中央古隆起及周缘地区大中型气田成藏条件及其分布。“八五”国家重点科技攻关项目成果报告,长庆石油勘探局,1995。

③ 马振芳等. 陕甘宁中部地区奥陶系风化壳地层划分及风化壳小层划分. 内刊,长庆石油勘探局,1992。

④ 李儒峰. 华北中上元古界及奥陶纪层序地层和油气—兼论碳酸盐岩层序地层和储层中碳氧同位素地球化学模式. 石油大学(北京)博士后研究报告,1997。

收稿日期: 1998-02-24 收修改稿日期: 1998-06-08

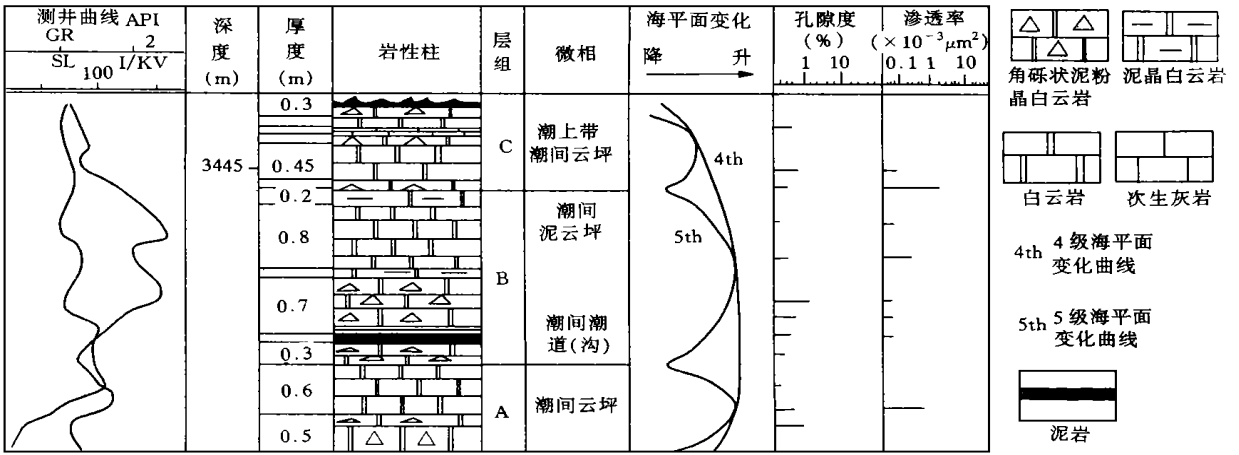


图 1 陕 37 井准层序 1 层序地层综合图

Fig. 1 The sequence stratigraphic map of parasequence 1 in Shan 37 well

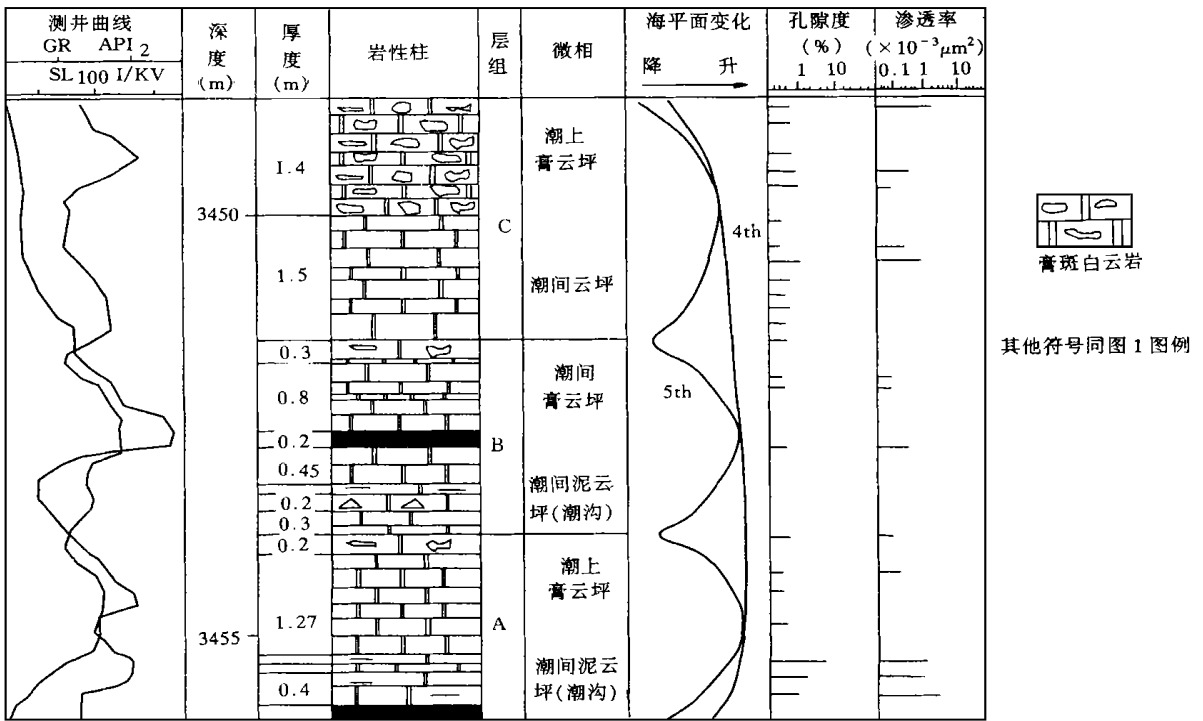


图 2 陕 37 井准层序 2 层序地层综合图

Fig. 2 The sequence stratigraphic map of parasequence 2 in Shan 37 well

根据准层序的定义: 准层序是以海泛面 (sea flooding surface) 或与其可对比的界面所限定的、相对整合的、彼此有成因联系的层或层组<sup>[5]</sup>。因此, 处于不同沉积部位的、同一次海泛事件内所构成的准层序, 具有等时性和可对比性。下面将以陕 37 井研究为基础, 参考陕 34 井、林 3 井和林 5 井资料, 对鄂尔多斯盆地中部马五<sub>1</sub> 亚段准层序组成特征进行了较为深入的研究。

准层序 1 (图 1): 相当于马五<sub>1</sub>。在陕 34、陕 37 井中其厚度分别为 4.50 m 和 5.90 m。岩石类型为角砾状泥粉晶白云岩、泥晶白云岩、次生灰岩、黑色泥岩。准层序由三个层组组成 (A, B, C), 在测井曲线上也有明显反映。层组由下部角砾状泥粉晶白云岩和上部泥晶白云岩组成。根据岩石组合、沉积微相序列分析, 判断准层序 1 为潮间泥云坪、潮间潮道 (沟) — 潮上含膏云坪产物, 其中泥岩形成于潮间低

洼地带(坪洼)、低能环境, 次生灰岩是潮上带去白云岩化的产物。

准层序 2(图 2): 相当于马五<sub>1</sub><sup>2</sup>。在陕 34、陕 37 井中其厚度分别为 7.80 m 和 7.40 m。岩石类型为角砾状泥(粉)晶白云岩、黑色泥岩、泥粉晶白云岩、膏斑白云岩。准层序 2 由 3 个层组组成(A, B, C), 它们在测井曲线上有明显的反映。层组 A、B 自下而上均由角砾状泥晶白云岩、黑色泥岩、泥粉晶白云岩和膏斑云岩构成, 而层组 C 则由泥粉晶白云岩和膏斑云岩构成。根据上述岩石组合类型判断, 构成准层序 2 的微相类型有潮间带云坪、泥云坪、潮沟和潮上带的含膏云坪, 总体环境由潮间沉积转变为潮上沉积。

准层序 3(图 3): 相当于马五<sub>1</sub><sup>3</sup>。在陕 34、陕 37 井中, 其厚度分别为 3.70 m 和 4.60 m。岩石类型为角砾状泥晶白云岩、细粉晶白云岩和膏斑云岩。准层序 3 在测井曲线上表现为两个高自然伽玛峰值间夹一宽缓的低自然伽玛值, 测井曲线变化呈块状组合型。准层序 3 由 2 个层组组成(A, B)。层组 A 自下而上由薄层角砾状泥晶云岩、中薄层泥粉晶云岩和厚层膏斑云岩组成; 层组 B 由角砾状泥晶云岩和膏斑云岩组成, 但层组厚度明显减薄, 说明层组 A 形成时的可容纳空间大于层组 B, 即海平面下降, 水体变浅的结果。根据上述岩石组合类型判断, 构成准层序 3 的微相类型有潮间带的泥云坪、云坪和潮上带的含膏云坪、藻泥云坪, 总体环境由潮间沉积转变为潮上沉积。从上述岩石组合类型判断, 构成准

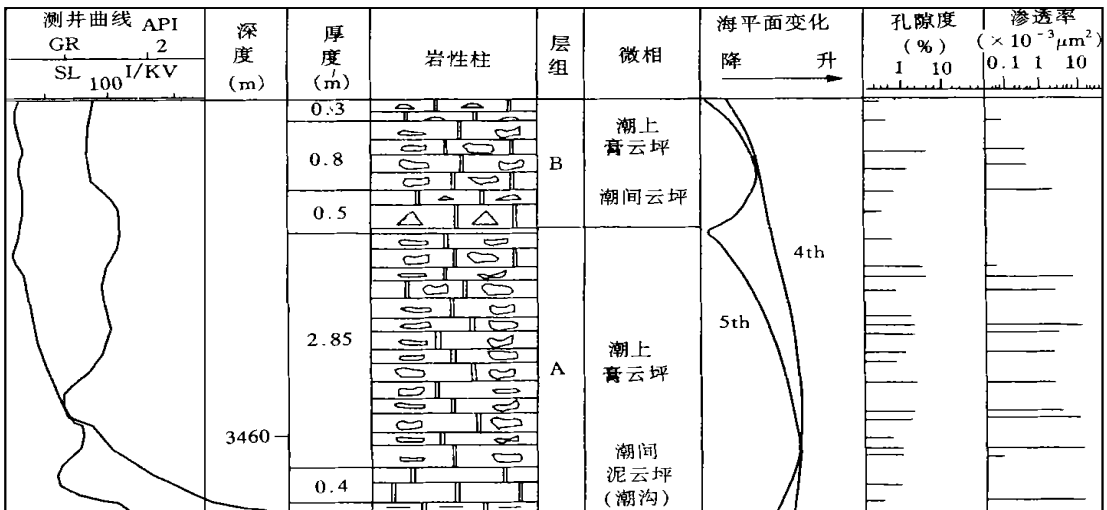
层序 2 的微相类型有潮间带云坪、泥云坪、潮沟和潮上带的含膏云坪, 总体环境由潮间沉积转变为潮上沉积。

准层序 4(图 4): 相当于马<sub>1</sub><sup>4</sup>。在陕 34、陕 37 井中, 其厚度分别为 4.90 m 和 6.00 m。凝灰质泥岩、角砾状泥晶云岩、泥粉晶白云岩和膏斑云岩。准层序 4 在测井曲线上表现为“M”形。准层序 4 由 3 个层组组成(A, B, C)。层组 A 自下而上由泥粉晶灰岩和膏溶角砾岩组成; 层组 B 由角砾状泥晶云岩和泥粉晶云岩组成; 层组 C 由角砾状泥晶云岩、泥粉晶云岩和泥岩组成。准层序 4 底部深灰—灰黑色凝灰岩是鄂尔多斯中部奥陶系风化壳的标志层, 以高伽玛值为特征, 属沉积火山碎屑岩。根据岩石及其组合判断, 准层序的微相类型有潮间泥云坪、云坪和潮上含膏云坪、云坪和藻泥云坪, 总体环境由潮间云坪演化为潮间上潮沟微相。

### 3 马五<sub>1</sub> 亚段高分辨率层序地层格架中风化成岩(岩溶)模式

碳酸盐岩层序地层格架中, 准层序形成时间较短(0.1~0.5 Ma), 厚度一般小于 10 m<sup>[6,7]</sup>。尽管不同剖面构成准层序的沉积相及微相有一定差异, 但是, 准层序总是反映着海水向上变浅、可容纳空间减小的趋势。多数准层序顶面具有暴露标志。碳酸盐岩层序地层中, 准层序周期性的重复再现被认为是它旋回作用或自旋回作用的结果<sup>[8,9]</sup>。

鄂尔多斯中部马五<sub>1</sub> 亚段准层序除具碳酸盐岩



注: 图例同前

图 3 陕 37 井准层序 3 层序地层综合图

Fig. 3 The sequence stratigraphic map of parasequence 3 in Shan 37 well

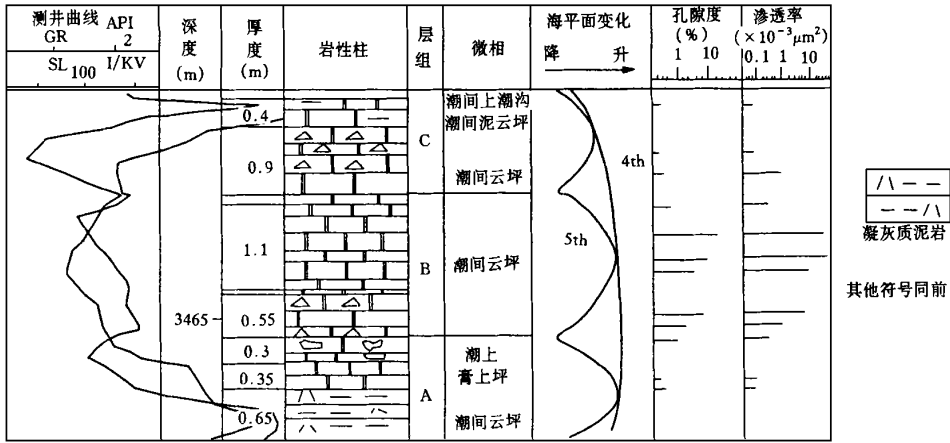


图 4 陕 37 井准层序 4 层序地层综合图

Fig. 4 The sequence stratigraphic map of parasequence 4 in Shan 37 well

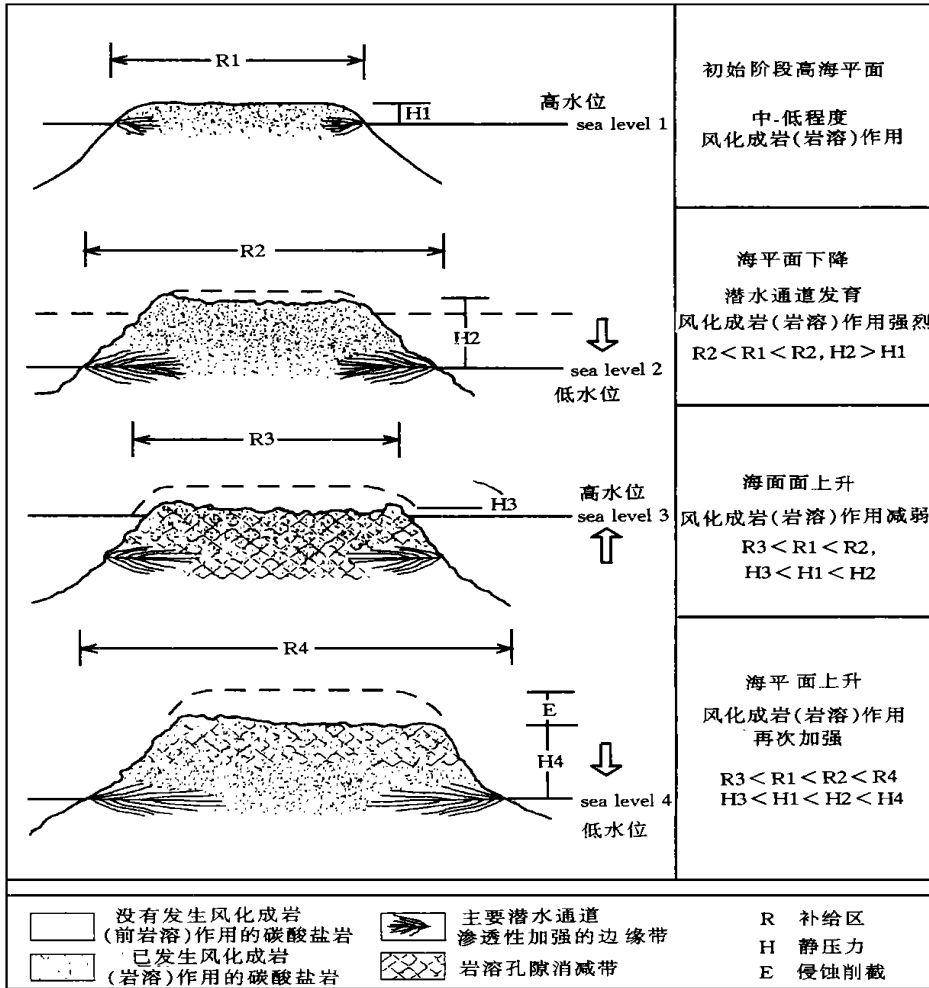


图 5 风化成岩(岩溶)作用与海平面变化关系模式

Fig. 5 The relationship between the diagenesis( karst)and sea-level change

层序地层中准层序一般特征外, 还有其特殊性, 马五<sub>1</sub> 亚段准层序组总体形成于海平面下降期, 海平面频繁升降, 造成多个海泛面和海进侵蚀面<sup>[10]</sup>, 但该时期总体上为非正常盐度的云坪—含膏云坪沉积。研究马五<sub>1</sub> 亚段 4 个准层序的组成特征, 归纳出其风化成岩(岩溶)作用与海平面变化的关系模式(图 5)。

准层序在初始相对高海平面位置时(sea level 1), 风化成岩岩溶作用较弱, 边缘带潜水通道不发育, 渗透性差(图 5A)。

随着海平面的下降(sea level 2), 准层序发生强烈的风化成岩(岩溶)作用, 孔隙水静压力增大, 潜水通道发育, 大气淡水补给区扩大, 并伴随有较弱侵蚀作用发生, 该侵蚀面即为层组界面(图 5B)。

当海平面再次上升(sea level 3)时, 风化成岩(岩溶)作用减弱, 先前风化成岩(岩溶)作用形成的孔隙部分或全部被海相成岩所胶结充填, 孔隙水静压力、大气淡水补给区面积和潜水通道均减小, 侵蚀作用加强(图 5C)。

当海平面再次下降时(sea level 4), 又发生强烈风化成岩(岩溶)作用, 该期作用包括了对 C 阶段产物的改造和新的风化(岩溶)层的形成, 此时, 准层序具有淡水补给区和孔隙中静水压力最大、潜水通道发育、边缘带渗透增强和侵蚀削截幅度大的特征(图 5D)。

上述随着海平面的升降变化发生的风化成岩(岩溶)旋回, 在准层序内可以包含一个或多个, 而准层序顶部侵蚀面则是海平面下降幅度相对最大的产物。

随海平面升降的准层序的风化成岩(岩溶)模式的建立为层间岩溶和后期高级别的风化成岩(岩溶)作用提供了基础, 同时也揭示了在碳酸盐层序地层格架中, 不同级别的海平面变化周期, 控制着不同级别的沉积层序(从超层序到准层序乃至层组)和不同级别的风化成岩(岩溶)作用, 由此决定了碳酸盐岩风化壳储层具有多级别、多旋回的特征。因此, 马五<sub>1</sub> 亚段准层序风化成岩(岩溶)模式的建立, 有助于掌握风化壳储层的分布律, 达到有效预测风化壳型储层的目的。

#### 4 马五<sub>1</sub> 亚段高分辨率层序地层格架内的储层特征

鄂尔多斯奥陶系风化壳储层孔隙形成和演化的

主要控制因素是: 储集岩形成时的沉积环境和经历的成岩作用。根据岩芯、薄片观察, 结合铸体薄片、扫描电镜和图像分析等资料, 综合研究了马五<sub>1</sub> 亚段高分辨率层序地层格架中各准层序的储层特征。

准层序 1 和准层序 2 的主要储集岩类型: 均为膏斑云岩、角砾状粉晶云岩; 孔隙结构类型为: 小孔—中孔细喉; 孔隙度( $\Phi$ )为 7.52%~5.10%, 渗透率为  $2.17 \times 10^{-3} \sim 1.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 裂缝类型为风化溶蚀直缝和高角度构造缝。试气结果为中等产能。

准层序 3 的主要储集岩类型: 为溶孔状粉晶云岩、细粉晶云岩和角砾化溶孔状云岩; 孔隙结构类型为大孔细喉和大、中孔粗喉; 孔隙度为 16.60%~7.35%, 渗透率为  $316.01 \times 10^{-3} \sim 2.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 裂缝类型为不规则网状缝。试气结果表明自然产能好。

准层序 4 的主要储集岩类型: 为膏斑泥粉晶云岩、角砾状细粉晶云岩; 孔隙结构类型为小孔—中、小孔微细喉; 孔隙度为 5.21%~2.45%, 渗透率为  $1.32 \times 10^{-3} \sim 0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 裂缝以角砾间缝为主, 构造缝、压溶缝和岩溶拉裂缝也较发育。试气结果表明为低能。

准层序 1~4 的储层特征是沉积和成岩作用的综合反映。这里要强调的是准层序界面(层组界面)对马五<sub>1</sub> 期风化壳储层的影响最为重要, 它既导致岩石组成和结构的变化, 又为层间岩溶提供了物质基础, 因为层间岩溶发育在准层序(层组)的顶部, 一旦海平面下降, 准层序(层组)顶部便暴露, 导致岩溶发育。

层间岩溶形成的溶蚀孔洞在纵向上分布与原始膏斑沉积特征一致, 具有明显的多旋回性。横向上受沉积相带制约。在研究区内准层序 1、2 孔洞层受后期岩溶侵蚀切割残留不全, 储集性能受到一定影响; 准层序 3 孔洞层是中部气田的主力产层; 准层序 4 孔洞层因岩溶作用局限, 在中部地区为非主力产层。因此, 在碳酸盐岩风化壳储层中, 重视不同级别沉积层序界面研究, 将有利于发现和预测有利储层的纵向分布和横向展布规律。

#### 5 结论

1. 在鄂尔多斯盆地中部马家沟组马五<sub>1</sub> 亚段内, 识别出 4 个准层序, 建立了该时期高分辨率层序地层格架。

2. 系统研究马五<sub>1</sub> 亚段 4 个准层序的组成特

点,建立了风化成岩(岩溶)作用与海平面变化的关系模式(准层序风化成岩模式),该模式的建立从成因上阐明了:层间岩溶和后期高级别的风化成岩(岩溶)作用发生的过程和控制因素,展示了在碳酸盐岩层序地层格架中,不同级别的海平面变化周期,控制着不同级别的沉积层序(从超层序到准层序乃至层组)和不同级别的风化成岩(岩溶)作用,由此导致碳酸盐岩风化壳储层具有多级别、多旋回的特征。

3. 综合研究了马五<sub>1</sub>亚段高分辨率层序地层格架中准层序1~4的储层特征,指出:准层序性质的差异,必然导致其储层物性的不同。准层序界面(层组界面)对马五<sub>1</sub>段风化壳储层的影响最为重要,它既导致岩石组成和结构的变化,又为层间岩溶提供了物质基础。综合研究认为:研究区准层序1、2孔洞层受后期岩溶侵蚀切割残留不全,使其储集性能受到一定影响;准层序3孔洞层是中部气田的主力产层;准层序4孔洞层因岩溶作用局限,在中部地区为非主力产层。

#### 参 考 文 献

- 1 翟光明主编,中国石油地质志卷十二—长庆油田[M].北京:石油工业出版社,1992.
- 2 王宝清.古岩溶与储层研究—陕甘宁盆地东缘奥陶系顶部储层特

- 征[M].北京:石油工业出版社,1995.
- 3 王少昌.鄂尔多斯地区下古生界天然气特征及远景[A].天然气地质论文集[C],北京:石油工业出版社,1989,49~56.
- 4 Posamentier H W, Allen G P, James D P. High resolution sequence stratigraphy—the East Coulee Delta, Alberta[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1992, 62(2): 310~317.
- 5 Van Wagoner J C. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[A]. In: Wilgus C K, ed. Sea-level changes: an integrated approach Society of Economic Paleontologists and Mineralogists[C], Special Publication, 1988, 42: 39~45.
- 6 Vail P R. The stratigraphic signature of tectonics and sedimentology—an overview[A]. In: Einsele G, et al eds. Cycles and events in stratigraphy[C], Springer-Verlag Berlin, 1991, 617~659.
- 7 Wang Honzhen. A scheme of the hierarchy for sequence stratigraphy [J]. Journal of Chian University of Geosciences, 1996, 7(1): 1~12.
- 8 Tucker M E. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy[A]. In: Wright P V, et al, eds. Sedimentology Review/1 Blackwell Scientific Publications[C], Oxford, 1993, 51~72.
- 9 Suasser A. Lagoonal—peritidal sequences in carbonate environments: autocyclic and allocyclic processes[A]. In: Einsele G, et al eds. Cycles and Events in Stratigraphy[C]. Springer Verlag, 1991, 709~721.
- 10 Weimer R J. Relation of unconformities and sea level changes, Cretaceous of Western Interior, U. S. A. In: Schlee J S, ed. Interregional uniformities and hydrocarbon accumulation[J]. AAPG Memoir 36, 1984, 7~35.

## Diagenesis Model and Reservoir Characteristics within High Resolution Sequence Stratigraphic Framework in the Mawu—1 Submember in Ordos Basin, China

LI Ru-feng      BAO Zhi-dong

(Basin and Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing Changpin 102200)

### Abstract

Based on the theory of sequence stratigraphy, the sequence stratigraphic characteristics of Ordovician weathering residuals in central Ordos Basin were studied, and the high resolution sequence stratigraphic framework for the Mawu—1 submember was established, in which 4 parasequences, i. e., Mawu1—1, Mawu1—2, Mawu1—3 and Mawu1—4 were identified. Generally, the parasequence sets of Mawu—1 submember formed at the descent stage of sea-level, when the frequent change of sea-level resulted in multiple marines flooding surfaces and transgressive surfaces, and the deposits mainly consist of abnormal salinity possessing gypsum flat rocks.

A parasequence may include one or more weathering—diagenesis cycles resulted from the change of sea-level. The top erosion surface of a parasequence corresponds to the maximum descent stage of sea-level. The relationship pattern between sea-level variation and weathering—diagenesis (karstification) was set up in this