

# 陕甘宁盆地中部马五段上部 成岩层序地层学研究及其意义

周劲松

(中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100011)

赵澄林

(石油大学地球科学系, 北京 102200)

刘明梅

(中国地质大学地球科学院, 北京 100083)

**主题词** 陕甘宁盆地中部 成岩层序地层学 马五段上部 意义

**提要** 陕甘宁盆地具有较有利的成岩层序地层学研究条件。根据多种资料, 将盆地中部马五段上部划分出八个准层序。准层序内部的酸不溶物含量、自然伽玛曲线、稳定碳同位素值及残余含盐量等参数呈现规律性变化, 这为相似类型地层的准层序划分提供了新的方法。在不同的成岩作用中, 准层序上部的溶解作用/去膏化作用明显强于准层序下部; 准层序上部多为准同生白云岩化形成的泥-粉晶白云岩, 下部则多为再次云化形成的细粉晶-粗粉晶白云岩; 压溶作用形成的缝合线在层组底部的出现概率远大于层组上部。研究发现, 暴露型准层序界面的平均孔隙度与层序界面的平均孔隙度相差不大, 表明暴露型准层序界面对形成和保存孔隙的贡献可能比层序界面更大, 应受到足够的重视。多套平行叠置发育良好的暴露型准层序界面应是油气的良好赋存场所。

## 1 引言

层序地层学自诞生之日起, 便在地学界掀起了一浪又一浪的研究热潮。无论是碳酸盐岩地层还是碎屑岩地层, 无论是海相沉积还是陆相沉积, 各种构造背景和气候环境下的层序地层学研究始终占据着沉积学领域的前沿位置, 大量的研究成果被广泛应用于矿产资源的勘探, 尤其是油气领域<sup>[1-3]</sup>。但九十年代以前的层序地层学是以宏观研究为主, 着重于各级层序的识别、划分、展布和成因研究, 对于层序内部的微观研究尚不够深入。随着全球层序划分工作的进一步进行, 层序界面的识别变得更加困难, 而识别各级层序界面又是层序地层学研究的基础, 因此层序界面的识别不得不寻求其它新方法。

人们在相关的研究中发现, 沉积岩粒间胶结物、次生加大边、自生矿物和孔洞充填矿物中, 准确记载着表征当时地球动力学环境、物理化学条件及各种自然变迁的丰富信息。在与油气储层有关的孔隙演化研究中, 也发现了孔隙层和渗透层与层序界面的相关关系。因此, 一些具有远见卓识的沉积学家意识到成岩微观资料在层序地层学研究中尤其是在层序界面识别中的重要性, 并将成岩作用与层序研究有机地结合起来, 最终导致成岩层序地层学应运而生<sup>[4]</sup>。成岩层序地层学是以层序的地层成因特性为原理, 考虑到成岩作用在层序中不同

第一作者简介 周劲松, 男, 27岁, 1998年获石油大学(北京)沉积学博士学位, 从事石油地质研究和管理工作的。

收稿日期 1998-12-09, 改回日期 2000-03-06

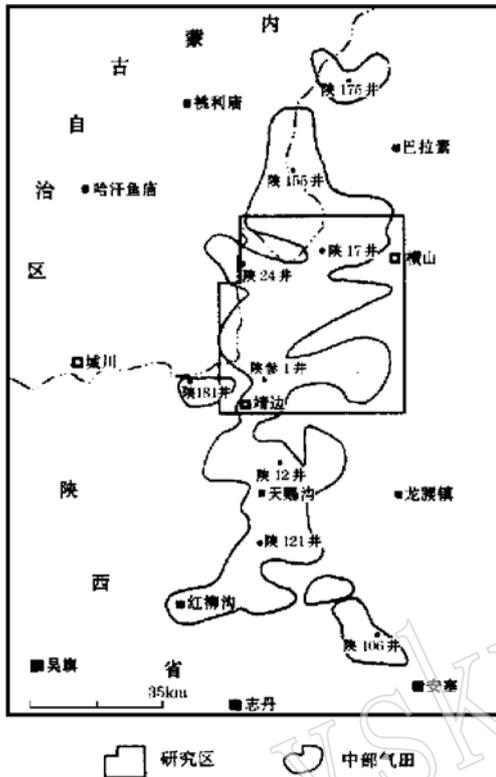


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographic location of the study area

部位的系统差异,利用成岩作用的微观资料,研究层序内部成岩作用的变化规律。它的研究内容主要包括四个方面:胶结物与层序地层学,孔隙和孔隙流体阶段性演化与海平面周期性变化的关系,成岩作用与沉积相和层序的关系,成岩作用与层序边界的关系。

成岩层序地层学无疑为层序地层学领域又开辟了一个新的研究方向。它把成岩作用和孔隙演化与海平面变化从成因角度有机地联系起来,从而导致层序界面的识别方法发生了深刻的变化,从原来以宏观标志为主转变为宏观和微观相结合,同时使得成岩矿物研究方法在层序地层学中的应用成为了可能。

陕甘宁盆地中部的奥陶系为广阔的碳酸盐陆表海沉积,以白云岩为主的马家沟组第五段上部已构成中部气田下古生界的主力产层。众所周知,陕甘宁盆地腹地未经历强烈的构造运动,地层平缓。勘探表明,在奥陶系碳酸盐岩中没有发现大的构造圈闭,而是以漫长的差异成岩作用所形成的隐蔽性岩性圈闭为主。本文将从成岩层序地层学角度对主力含气层段马五<sub>4</sub>—马五<sub>1</sub>小层进行初步研究,以期在油气勘探工作中隐蔽性岩性圈闭和有利储集层的

寻找,提供有价值的新资料及实例。研究区位于陕甘宁盆地中部靖边—横山地区(图1),是陕甘宁大气田的核心部位。

## 2 研究区准层序划分及特征

盆地中部下古生界所划分的三级层序中,主力产气层——奥陶系顶部风化壳构成了其中一个三级层序的I型层序界面。在风化壳内部,含气层段并不是一个单一的层,而是由多层构成。因此,有必要从准层序的尺度规模来剖析层序内部的变化规律,从而找出含气层段的分布规律。

研究区识别和划分准层序的主要依据是:(1)关键界面,包括短期地表暴露面和沉积微相突变面;(2)岩性组合;(3)电性特征,主要为自然伽玛测井曲线;(4)沉积微相;(5)稳定碳同位素;(6)其它岩石地球化学特征。据此,在研究区内共识别出8个准层序(图2)。

准层序1大致相当于马五<sub>4</sub>小层,由两个层组组成,层组A为潮间泻湖和泥云坪沉积,层组B为含膏云坪沉积;准层序2相当于马五<sub>3</sub>小层,为潮间泻湖到泥云坪的变浅沉积序列;准层序3相当于马五<sub>2</sub>小层,由两个层组组成,层组A由潮间带泥云坪沉积变为上潮间

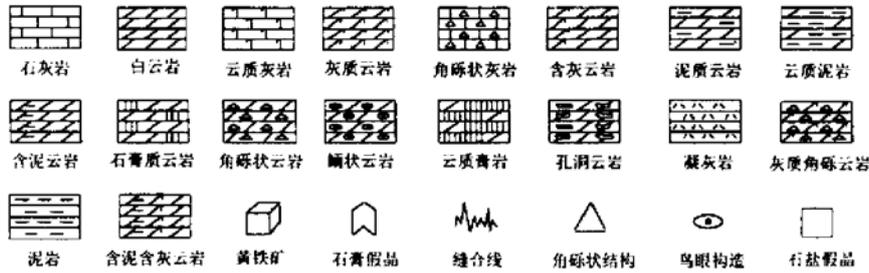
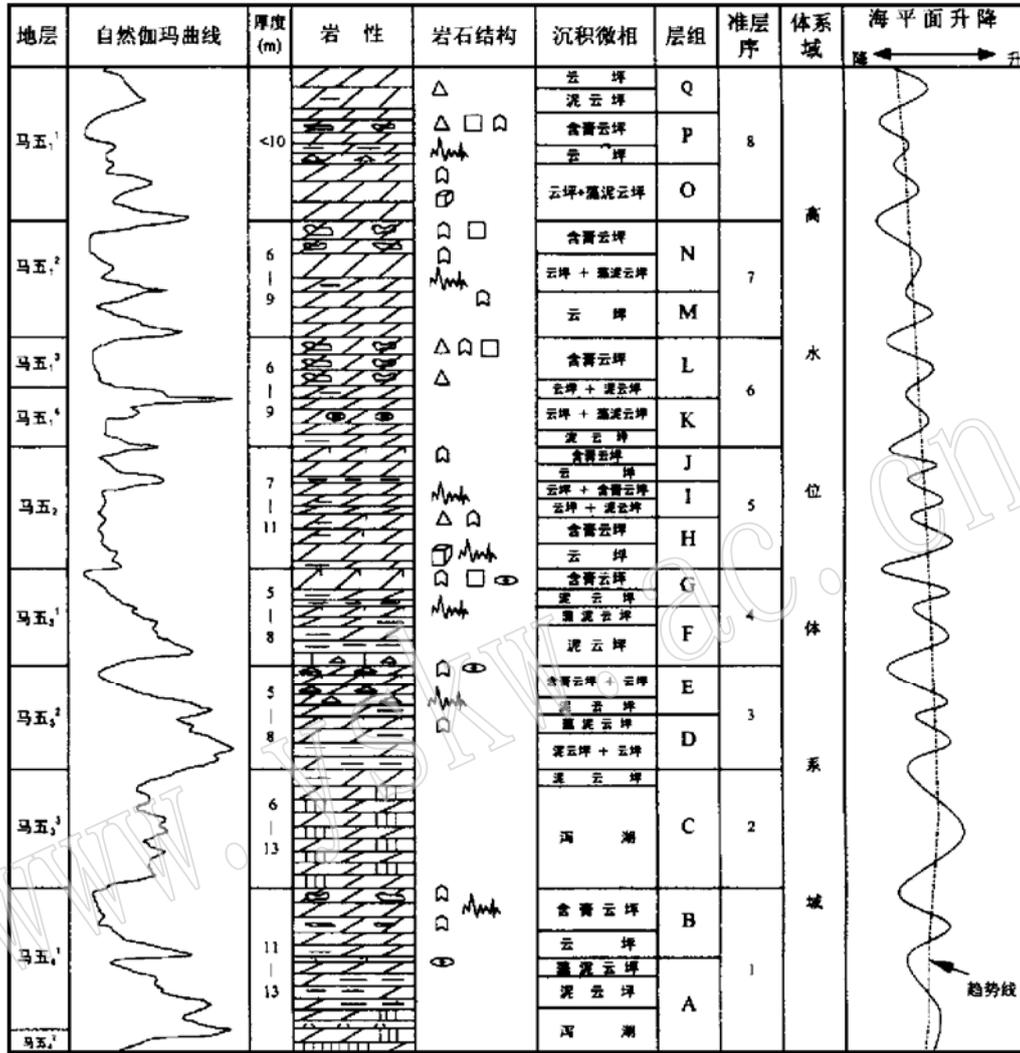


图 2 陕甘宁盆地中部马五段上部准层序划分

Fig. 2 Parasequence division of Upper Ma5 Member in Central Ordos Basin

藻泥云坪沉积, 层组 B 由泥云坪沉积过渡至云坪和含膏云坪沉积; 准层序 4 相当于马五<sub>3</sub> 小层, 由两个层组组成, 层组 A 由潮道中的角砾岩变为洼地中沉积的大套泥云岩, 层组 B 下部

为薄层泥岩和泥云岩,上部为灰质云岩,含石膏假晶;准层序5相当于马五<sub>2</sub>小层,由三个层组组成,层组A由潮间洼地变为含膏云坪沉积,层组B下部为云岩和含泥云岩,上部为角砾云岩和云岩,层组C下部为黑色泥岩和云岩,上部为含石膏假晶云岩;准层序6相当于马五<sub>4</sub>—马五<sub>3</sub>小层,包括两个层组,层组A下部为泥云坪泥质云岩,向上变为云坪云岩和潮沟内的鲕状云岩,层组B底部为短期海进沉积的云质泥岩,下部为潮间云坪和泥云坪云岩和泥质云岩,上部逐渐变为潮上含膏云坪的含石膏、石盐假晶的孔洞状云岩;准层序7相当于马五<sub>2</sub>小层,分为两个层组,层组A由底部薄层泥岩向上变为含石膏假晶的云岩,层组B由潮间云岩向上变浅为盐溶角砾岩,顶部含假晶;准层序8相当于马五<sub>1</sub>小层,分为三个层组,层组A下部为大套泥粉晶云岩,顶部含石膏假晶,层组B下部为深灰色云岩,向上含石盐假晶,为下潮间—潮上沉积序列,层组C下部为潮沟颗粒云岩,向上变为泥云坪含泥云岩和云岩。马五<sub>1</sub>小层之上的下古生界地层在盆地中部几乎全部缺失。

李儒峰等认为,由于准层序的形成是海平面先上升后下降的结果,因此在碳酸盐岩中,无论是层序还是准层序,其内部的碳同位素值  $\delta^{13}\text{C}$  均是以相对低值开始,向上逐渐增高,然后又逐渐降低<sup>[5]</sup>。对6、7、8三个准层序内的碳、氧同位素分析表明,每个准层序内  $\delta^{13}\text{C}$  值的分布与上述规律相同(图3),如准层序6底部的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-3.0\text{‰}$  向上渐变为  $-0.7\text{‰}$ ,最后渐变为  $-1.7\text{‰}$ 。

在研究区这样一个碳酸盐蒸发潮坪上,海平面的变化常导致海水深浅往复和暴露程度的差异。前者在泥质和有机质含量上会有所表现,后者则在含盐量上体现出来。在油基泥

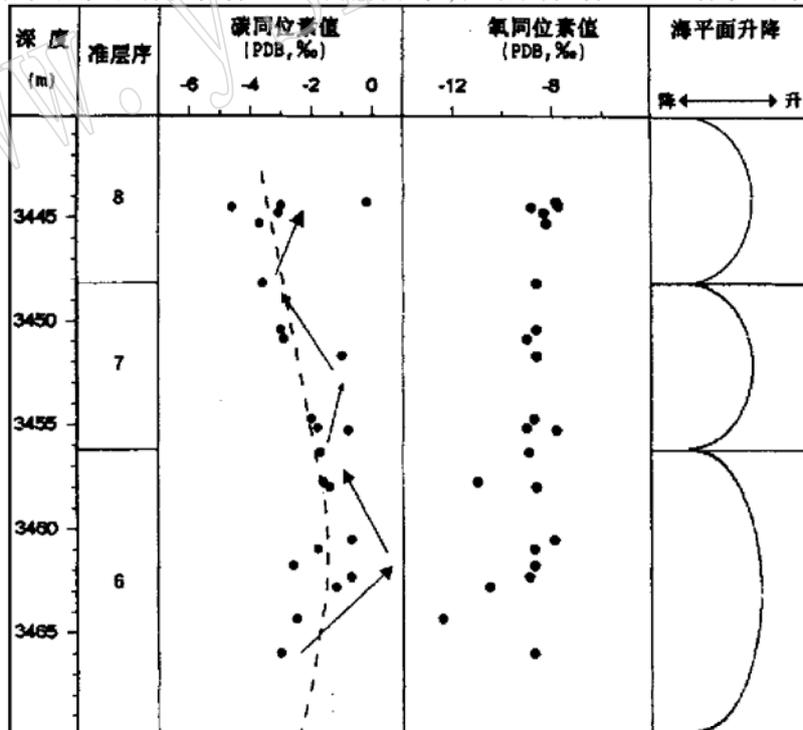


图3 马五段上部稳定碳同位素值变化与准层序的关系

Fig. 3 Relationship between stable carbon isotopic variation and parasequences in Upper Ma5 Member

浆井林5井的残余含盐量和酸不溶物含量随深度变化的关系图上(图4),可以看出准层序内从下至上含盐量逐渐升高,而酸不溶物含量的分布规律正好与之相反。由于准层序是由一次相对突然的海水变深形成(威尔格斯等,1991)<sup>[6]</sup>,在其形成早期,海水相对变深,由潮上或上潮间突变为下潮间或浅潮下,沉积物中的泥质含量和有机质含量较高;而准层序形成晚期,海水逐渐变浅,沉积环境为潮上或上潮间带,在强蒸发气候条件下一般含石膏或石盐沉积,同时泥质含量和有机质含量相对较低,因此导致酸不溶物含量和含盐量的规律性分布。

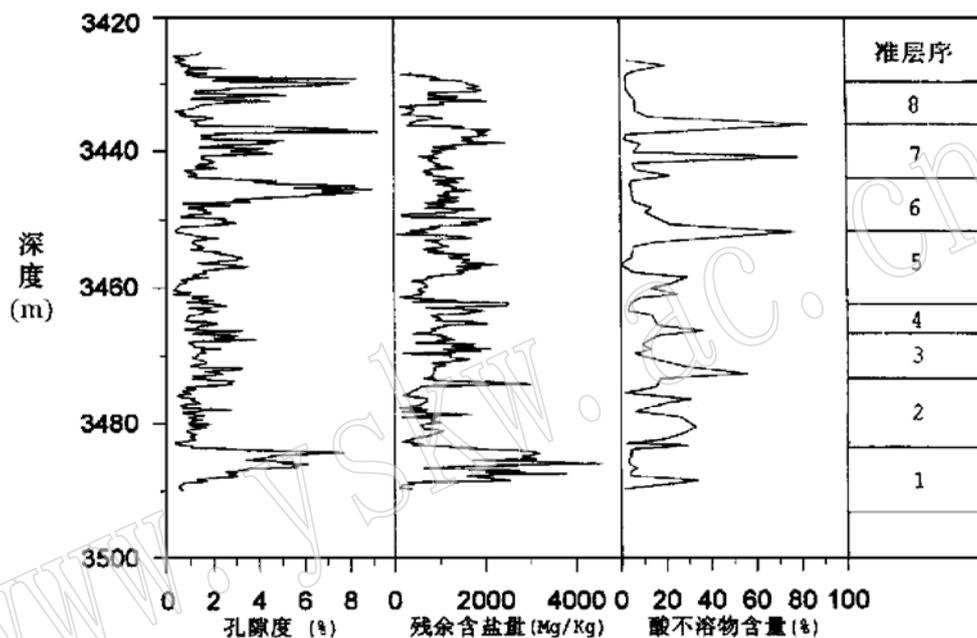


图4 准层序内残余含盐量、酸不溶物含量和孔隙度随深度变化的典型关系图

Fig. 4 Typical variations of remnant salinity, acid-insoluble substance and porosity with depth in parasequences

研究区准层序均为米级规模,准层序内部反映水体逐渐变浅的标志明显,自然伽玛曲线与之对应良好。层序顶部多出现含膏云坪微相中形成的石膏假晶、溶蚀孔洞和角砾状结构,反映持续暴露的证据充分,显然可以用他旋回模式加以解释<sup>[7]</sup>。

### 3 成岩作用与准层序

#### 3.1 溶解作用/去膏化作用与准层序

如前所述,本区处在强蒸发条件下,大部分准层序为暴露型准层序,其上部多含石膏假晶。在准层序形成后的持续暴露时间里,顶部的易溶矿物在多次的降雨过程中全部或部分溶解形成选择性溶蚀孔,或者经后期去膏化作用形成方解石的石膏假晶。而在准层序下部由于缺失原始的石膏或石盐,一般缺乏此种现象。因此在镜下观察时发现较多的选择性溶蚀现象或去膏化现象发生突变时,即可判断出准层序的顶底位置。

考虑到溶解作用与岩石孔隙度的正相关关系,工作中对中部气田二十余口井的孔隙度和深度进行了研究,作出各井的孔深关系图(图4)。研究发现,与典型井一样,几乎每口井中各准层序的顶部孔隙度都比底部的高。研究还发现,作为I型层序界面的马五<sub>1</sub>亚段经历了加里东抬升期漫长的风化壳岩溶作用的影响,但在研究区大部分钻井中该亚段各准层序顶部高孔隙度的平均值却与受加里东期风化壳岩溶影响微弱的马五<sub>4</sub>准层序顶部的孔隙度相当。

### 3.2 白云岩化作用与准层序

研究发现,准层序内白云岩组构从上至下有所变化。在多数准层序内(准层序1, 5, 6, 7, 8),顶部为泥粉晶白云岩,中下部为晶径稍粗的白云岩,韩征等称之为“结晶白云岩”<sup>[8]</sup>。实际上,这两种晶形均为他形的白云石成因不尽相同。中下部的白云石在阴极发光下常具有“加大”现象,即在紫红色主色周围有一圈红色包边,表明其经历了二次云化,即准层序形成早期,潮间带的环境及强蒸发的气候条件使灰泥被准同生云化;准层序形成晚期,暴露使得泥粉晶白云石晶间孔隙水浓度增大,多余的富镁流体向下渗流,使准层序下部的白云岩被再次云化。

研究还发现,部分区块的一些准层序(准层序1, 2, 3, 4)的顶、底部白云岩形成机理不一致。准层序下部为相对深水成因的膏盐湖型准同生云化,上部为暴露成因的云坪型准同生云化。这是因为准层序形成初期水体相对较深的膏盐湖中高 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 比的海水使初期底部灰泥云化,而准层序形成晚期沉积环境转为潮间-潮上带,形成准同生云化成因的白云岩。

综合起来看,白云岩化与准层序的关系可以概括为:(1)在云坪型白云岩准层序中,准层序下部为结晶白云岩,上部为准同生白云岩;(2)在膏盐湖型和云坪型复合白云岩准层序中,下部以膏盐湖型准同生云化为主,上部则以云坪型准同生云化为主。

### 3.3 压溶作用与准层序

在对多口井的缝合线分布进行研究之后发现,缝合线多发育于准层序界面上下或层组界面之上(图2),这为识别准层序或层组界面提供了辅助标志。在准层序或层组下部通常具有较高的泥质和有机质含量,这可从各井的酸不溶物含量分析中得到验证。准层序在深埋地下时,受各种因素的影响,整个白云岩层内将产生压溶作用,只是发育程度和方式不同而已。准层序或层组下部所含的较多粘土矿物在压溶过程中起到了催化剂的作用<sup>[9]</sup>,再加上一般该部位有较高含量的有机质,在热演化脱羧过程中产生 $CO_2$ 和有机酸,使下部白云岩的压溶作用显著强于准层序或层组上部,形成缝合线或非缝合线状压溶现象<sup>[10]</sup>。此外还有一种情况,暴露型准层序顶部所形成的次生孔洞缝被后期泥质充填,在深埋过程中,同样能起到催化剂的作用,因此在准层序顶部亦能见到缝合线,如有些富含机械充填泥的次生灰岩中也见到缝合线。实际观察中准层序顶部的缝合线常与缝洞和角砾裂纹相伴,这也是佐证。但与原始沉积相关的非缝合线状压溶在准层序顶部却较少见到。因此,在利用压溶作用辅助性地识别层序界面时,除考虑到沉积环境、气候相关因素外,要剔除掉与原始沉积地层相关性不大的因素,且与其它方法相结合才能更准确地划分准层序。

## 4 讨论和意义

根据上述几种不同成岩作用在准层序中的发育规律,可以初步建立研究区的成岩层序

地层学模式: 在强蒸发气候条件下, 在平坦的碳酸盐台地上, 一次次快速的相对海平面上升形成了一系列准层序。每一准层序形成早期, 海水相对较深, 沉积相带偏下, 沉积物中有机质含量和泥质较高, 同时在地形略低洼处形成膏盐湖型准同生白云岩, 随着海水逐渐变浅, 沉积相带向海推移, 间歇暴露带形成云坪型准同生白云岩, 沉积物中石膏含量逐渐增多, 有机质和泥质含量逐渐降低; 准层序形成晚期, 在持续暴露蒸发下, 泥粉晶准同生白云石晶间孔隙水浓度增大, 多余的富镁流体向下渗流, 使准层序下部的白云岩被再次云化形成结晶白云岩, 导致准层序上下部分白云石形成机制的差异; 在暴露期, 准层序上部也会受到降雨的影响, 部分石膏溶解形成膏溶铸模孔或者经去膏化作用形成石膏假晶, 因此准层序上部的孔隙度一般高于准层序下部。这套地层深埋后, 由于准层序各部位有机质和泥质含量分布不均, 导致压溶作用形成的缝合线多在准层序或层组界面附近出现。

前已述及, 研究区大部分钻井中各准层序顶部的孔隙度均值与受加里东期风化壳岩溶作用影响微弱的马五<sub>4</sub>准层序顶部的孔隙度相当。虽然, 马六段三级层序和准层序8受加里东期风化壳岩溶影响最重, 但在不少井中反映出这两个地层的平均孔隙度比其下伏准层序的还低。这表明, 长期暴露所形成的孔隙度并不比短期暴露的高。实际上, 陕甘宁盆地中部大气田奥陶系主力产层马五<sub>1</sub>小层、马五<sub>2</sub>小层、马五<sub>3</sub>小层和马五<sub>4</sub>小层中的产气部位均位于各小层的顶部或上部, 也即位于准层序6、准层序7、准层序8和准层序1的顶部或上部。从图4中可以看出, 这些准层序顶部的孔隙度大致相当, 即受加里东期风化壳岩溶作用影响强烈的准层序与受其影响微弱的准层序差别不大, 表明准层序界面对天然气储层的影响和控制似乎要大于层序界面。前人的研究也证明, 长期暴露不能使总孔隙度增加, 只是使孔隙网络重排, 它往往对层序顶部进行大规模的改造, 使地形降低, 并在区域上形成角砾岩, 原有孔隙度被岩石破碎而损坏, 或者被机械充填物堵塞<sup>[4]</sup>。而短期暴露所形成的孔隙(一般为铸模孔或溶蚀扩大孔)较为完整, 能抵抗短期的机械破坏作用从而得到保存。因此, 笔者认为准层序界面或短期暴露的层序界面应该受到足够的重视。

根据上述论述, 在强蒸发气候条件下的陆表海平缓碳酸盐台地上, 寻找纵向平行叠置的暴露型准层序界面将成为油气勘探的一个必然指向, 多套发育良好的暴露型准层序界面无疑是油气的良好赋存场所。中部气田奥陶系主力气层在准层序中的规律性分布已经证明了该理论的可实践性, 同样它也可适用于相似气候条件下具有相似地质背景地区的油气勘探工作。

## 5 结论

(1) 一些地球化学指标对准层序的划分具有指示意义。

在研究区马五段上部识别出八个米级他旋回准层序, 准层序内部 $\delta^{13}\text{C}$ 值先升高后降低, 酸不溶物含量从下自上逐渐降低, 而残余含盐量则逐渐升高。此外, 准层序与自然伽玛曲线对应良好。这些参数为准层序的识别及划分提供了新的标志。

(2) 成岩作用在准层序内的发育具有规律性。

成岩作用包括溶解作用/去膏化作用、准同生云化作用和压溶作用。它们在准层序中的变化规律为: 受后期成岩作用的影响, 准层序上部的溶解作用/去膏化作用明显强于准层序下部; 上部多为准同生白云岩化形成的泥-粉晶白云岩, 下部则多为再次云化形成的细粉晶

—粗粉晶白云岩; 压溶作用形成的缝合线在层组或准层序界面附近的出现概率远大于其它部分。

(3) 指明有利的储集层分布。

在强蒸发气候条件下的陆表海平缓碳酸盐台地上, 多套发育良好、平行叠置的暴露型准层序界面是油气的良好赋存场所。

#### 参 考 文 献

- 1 Posamentier H W. Siliciclastic sequence stratigraphy and petroleum geology ——Where to from here? AAPG Bulletin, 1993, 77: 731~ 742.
- 2 Tucker M E, Calvet F, Hunt D. Sequence stratigraphy of carbonate ramps: system tracts, models and application to the Muschelkalk carbonate platforms of eastern Spain. In: Spec. Publs. Int. Ass. Sediment, 1993, 187~ 203.
- 3 Hunt D and Tucker M E. Sequence stratigraphy of carbonate shelves with an example from the mid-Cretaceous (Ugonian) of southern France. In: Spec. Publs. Int. Ass. Sediment, 1993, 397~ 415.
- 4 Saller A H. Unconformities and porosity development in carbonate strata: idea from a Hedberg Conference, AAPG Bulletin, 1994, 78(6): 857~ 872.
- 5 李儒峰, 刘本培. 碳氧同位素演化与碳酸盐岩层序地层关系研究 ——以黔南马平组为例. 地球科学, 1996, 21(3): 261~ 266.
- 6 威尔格斯等编, 徐怀大, 魏魁生, 洪卫东等译. 层序地层学原理 ——海平面变化综合分析. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- 7 Strasser A. Lagoonal-peritidal sequences in carbonate environments: autocyclic and allocyclic processes. In: Einsele G, Ricken W and Seilacher A eds. Cycles and Events in Stratigraphy, Berlin: Springer Verlag, 1991, 709~ 721.
- 8 韩 征, 辛文杰. 准同生白云岩形成机理及其储集性. 地学前缘, 1995, 2(3~ 4): 226~ 230.
- 9 Wanless H.R. Limestone response to stress: Pressure solution and dolomitization, Journal of sedimentary petrology, 1979, 49(2): 437~ 462.
- 10 张博全, 关振良, 潘 琳. 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩的压实作用. 地球科学, 1995, 20(3): 299~ 305.

## A Study of Diagenetic Sequence Stratigraphy of Upper Ma 5 Member, Central Ordos Basin and Its Significance

Zhou Jinsong

(China Oil & Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100011)

Zhao Chenglin

(Department of Geosciences, University of Petroleum, Beijing 102200)

Liu Mingmei

(Geoscience School, China University of Geosciences, Beijing 100083)

**Key words:** Central Ordos basin; diagenetic sequence stratigraphy; Upper Ma 5 Member; significance

#### Abstract

Ordos basin has favorable condition for the research work. On the basis of various sorts of  
(下转第 130 页) (to be continued on p. 130)

---

(上接第 120 页)(Continued from p. 120)

data, 8 parasequences were identified in Upper Ma 5 Member of the basin. Within each parasequence, content of substances indissoluble in acid, content of remnant gypsum,  $\delta^{13}\text{C}$  values and NG logging curve display regular changes, indicating the controlling role of sea\_level fluctuation. These parameters can provide new methods for the division of parasequence boundaries. Among different diageneses, dissolution in the upper part of each parasequence is stronger than that in the lower part. In most parasequences, dolomite in the lower part seems coarser than that in the upper part, and within most beddings pressure solution also occurs more likely at the bottom than in the upper part. It is discovered that the average porosity of exposed parasequence boundaries is similar to that at sequence boundaries, suggesting the larger contribution of parasequences boundary to the preservation of porosity than sequence boundary. Hence the exposed parasequence boundaries deserve more attention. If overlapped, a set of exposed parasequences boundaries would definitely become wonderful reservoirs for oil and gas.