

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩-蒸发岩层序地层模式及其对源-储的控制作用

张涛¹, 张亚雄¹, 金晓辉¹, 周雁¹, 张军涛¹, 谷宁¹, 张威², 王濡岳¹, 鲁锴¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石化华北油气分公司石油勘探开发研究院, 河南 郑州 450006)

摘要:在充分调研已有成果的基础上,按照 Vail 经典层序地层理论,综合考虑碳酸盐岩-蒸发岩沉积学原理、台地形态、盆内和古隆起边缘岩性组合特征等,提出了鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组蒸发岩主要赋存于层序下部、浅水碳酸盐岩赋存于层序上部的层序地层划分模式,据此将马家沟组划分为5个三级层序。三级层序界面分别位于马(马家沟组)一段、马三段、马五¹⁰亚段、马五⁶亚段和马五⁴亚段底部,马家沟组底部和顶部为区域不整合面。在三级层序低位域的时限内,蒸发岩和碳酸盐岩在时空上呈指状交叉,蒸发岩沉积的次数与相邻碳酸盐岩地层中无沉积或间断(不整合)的次数相关,这种四级-五级的沉积间断面是层间溶蚀发育的前提条件,同时也决定了蒸发岩间烃源岩的发育位置。处于低位域的马一段、马三段、马五⁶亚段3套蒸发岩层系发育潜在烃源岩,主要分布在环盐湖外围洼地及盆地中心斜坡区,具有层薄、累计厚度大的特征。沉积相与多级次层序界面控制储层的发育,主要形成了2类储层:①滩相白云岩孔隙型储层,主要发育在三级-四级层序高位体系域中、上部,沉积间断面与滩相叠加区为孔隙型储层发育的有利层位;②含膏岩中膏模溶孔型储层,主要发育在低位体系域的次级海侵期,古隆起边缘区潮坪相带是膏模溶孔型储层发育层位。

关键词:烃源岩;储层;层序地层模式;碳酸盐岩-蒸发岩;马家沟组;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sequence stratigraphy models of carbonate-evaporite successions and their controls on source rocks and reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

ZHANG Tao¹, ZHANG Yaxiong¹, JIN Xiaohui¹, ZHOU Yan¹, ZHANG Juntao¹, GU Ning¹, ZHANG Wei²,
WANG Ruyue¹, LU Kai¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206; 2. Petroleum Exploration & Production Research Institute, Hubei Branch of SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006)

Abstract: Based on the existing research results and the classical sequence stratigraphy theory of Vail P. R., this study takes into account the sedimentological principle of carbonate-evaporite, platform morphology, and lithological association characteristics of basin interior and margins to propose a sequence stratigraphic division model for the Majiagou Formation in Ordos Basin. According to the model, the sequence, which consists of evaporites mainly at the lower part and shallow water carbonates in the upper part, can be divided into five third-order sequences with boundaries respectively at the bottom of members of Ma1, Ma3, Ma5¹⁰, Ma5⁶, and Ma5⁴. The bottom and top of Majiagou Formation are regional unconformity surfaces. Within the duration of lowstand systems tract of these third-order sequences, the carbonates and evaporite interfinger each other. The number of the evaporite layers is related to the number of hiatus (unconformity) in the adjacent carbonate sequences. The existence of these 4–5th order hiatus (unconformities) is the prerequisite for the development of interlayer dissolution and determines the location of source rock layers of inter-evaporite. Potential hydrocarbon source rocks are likely to be developed in three evaporative sequences of Ma1, Ma3 and Ma5⁶ members in the lowstand systems tract, which are mainly distributed in the lows surrounding the salt lake and the slope areas of the basin center; moreover, are characterized by thin layers and large accumulated thickness. The sedimentary facies and multi-

收稿日期:2022-05-29;修订日期:2022-11-20。

第一作者简介:张涛(1973—),男,高级工程师,碳酸盐岩沉积储层。E-mail: zhangtao1973_syky@sinopec.com。

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010406)。

order sequence boundaries control the development of reservoirs, and two types of reservoirs are mainly formed: (1) The porous dolomitic reservoirs of beach facies are mainly developed in the middle and upper parts of highstand systems tract (HST) of third-to-fourth-order sequence, and the superimposed areas of the sedimentary hiatus and beach facies are the favorable zones for the porous reservoirs. (2) The moldic pore-type gypsodolomite reservoirs are mainly developed during the secondary transgression of the lowstand systems tract, and the tidal flat facies zone in the basin margins surrounding the paleo-uplift are the favorable horizons for the development of reservoirs of moldic pore type.

Key words: source rock, reservoir, sequence stratigraphy model, carbonate-evaporite, Majiagou Formation, Ordovician, Ordos Basin

引用格式:张涛,张亚雄,金晓辉,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩-蒸发岩层序地层模式及其对源-储的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 110-124. DOI: 10. 11743/ogg20230109.

ZHANG Tao, ZHANG Yaxiong, JIN Xiaohui, et al. Sequence stratigraphy models of carbonate-evaporite successions and their controls on source rocks and reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44 (1) : 110-124. DOI: 10. 11743/ogg20230109.

盆地级蒸发岩-碳酸盐岩共生体系指示了重要的古气候-古海洋-古地理背景^[1],也是全球范围内重要的油气储集岩类组合,因此,该共生沉积体系的研究是近些年沉积学和储层地质学研究的热点之一。目前,鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段(马五段)、四川盆地寒武系龙王庙组和三叠系雷口坡组、塔里木盆地寒武系盐下白云岩等地层中均发现了优质的油气储层和巨大的油气储量^[2-4]。不同学者对蒸发岩类型、沉积化学与水文学特征、与其对应的沉积环境和岩相组合、分布层位、形成模式及特殊性与普遍性规律等进行了系统综述,认为共生体系的发育是良好的古环境恢复替代指标及成岩指示工具^[5-7]。巨厚的蒸发岩沉淀能够改变海水性质和大气中氧气含量^[8],形成特殊的储集空间类型^[1]。气候变迁影响碳酸盐岩-膏盐岩共生体系岩性组合序列,早期白云岩化作用和微生物降解和热解释放的CO₂气体和有机酸是储层形成主控因素^[9]。

Vail倡导的层序地层学在等时地层格架建立、古地理重建和矿产预测等方面得到了广泛应用^[10-11],最新的层序地层学理论强调层序界面物理性质的明确界定,不同沉积背景的层序界面定义是关键^[12-13]。碳酸盐工厂在记录层序事件方面与碎屑岩的沉积作用机理有着本质区别,因而它们的层序标准模型有不同程度的差异,但标准模型的基本要素为所有沉积体系共有^[14-15]。碳酸盐岩-蒸发岩共生体系的层序地层学研究较为复杂,主要原因在于沉积作用原理的特殊性与叠置关系的多样性会影响到层序边界的界定。

前人对鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组的层序地层进行了大量的研究,但认识仍存在较大差异,主要表现为三级层序的个数、层序界面位置及体系域构成不

同^[16-23]。不同学者将同一套地层定为不同的体系域,如将马一段分别定为低位体系域、海侵体系域,还有人定为1个三级层序^[22]。层序分级混乱的原因主要在于不同学者对层序发育主控因素的理解不同,对层序界面的把握有别。三级层序划分的唯一客观标准就是以不整合面为界,内部可划分出多个体系域而且没有明显的不整合面^[24]。古构造和古地理背景及其形成演化较为复杂,三级层序具有多种类型^[25]。马家沟组存在巨厚蒸发岩(盐岩和硬石膏)层系,对蒸发岩成因的不同理解也导致对层序边界划分的差异。本文按照Vail经典层序地层学理论,综合考虑周期性与广海隔绝的碳酸盐岩-蒸发岩沉积序列、蒸发岩与碳酸盐岩沉积学原理、盆地中心与古隆起边缘岩性组合特征等,并结合前人对本区层序地层研究的成果,识别层序界面并提出三级层序划分方案,建立碳酸盐岩-蒸发岩层系的层序地层模式,据此预测马家沟组的烃源岩和储层的有利分布区,对鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩油气勘探方向优选具有重要参考借鉴作用。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是华北板块西部典型的克拉通边缘叠合盆地,经历了8个发展演化阶段,其中盆地边缘裂陷与陆内拗陷阶段(中、新元古代中期—早古生代中奥陶世)和周缘盆地碰撞造山阶段(晚奥陶世到早石炭世)是马家沟组形成与改造的主要阶段^[26]。奥陶纪的岩相古地理特征表现为“隆-拗相间”的沉积格局^[27],特别是马家沟组沉积期,盆地中-东部的拗陷区发育3套碳酸盐岩-蒸发岩旋回,蒸发岩向周缘的伊盟古隆起、中央古隆起超覆尖灭,南部黄陵-韩城古隆起相

变,而盆地西缘和南缘则以浅海-半深海相碳酸盐岩、泥岩沉积为主,说明马家沟组沉积期,鄂尔多斯盆地主体的北面为古陆,其余3面为间歇性隆起的浅水碳酸盐岩台地(图1a)。根据沉积旋回、岩性组合,马家沟组自下而上划分为马一段至马六段,形成碳酸盐岩与膏盐岩互层的地层结构,该地层结构主要受相对海平面升降和古地貌控制。包洪平提出的“干化蒸发、回灌重溶”的成因机制很好地解释了盆地中心区碳酸盐岩与蒸发岩间互叠置的地层结构特征以及膏岩层内部次级海侵所产生的泥质夹层^[28]。在海平面低位期盆地与外海完全隔绝,盆地中心坳陷区形成厚层膏盐岩,如马一段、马三段和马五段以潮坪、膏湖和膏盐湖等局限海蒸发环境为主,其中马五段蒸发岩最厚,自上而下进一步细分为10个亚段,即马五¹⁻¹⁰亚段(图1b),盐岩层主要分布在米脂—延安地区^[29],向外围盐岩逐步减薄,硬石膏含量增加,再向外为含膏白云岩、白云岩。在海平面处于高位期,盆地与广海完全连通,整个盆地处于开阔-局限台地沉积环境,主要沉积碳酸盐岩,夹

薄层硬石膏、膏质云岩和含膏结核白云岩,沉积相的分异主要受古隆起及古陆、古地形和海侵范围的影响。马二段、马四段、马六段主要发育局限和开阔海环境,以碳酸盐岩沉积为主,马家沟期末,海水全部退出了鄂尔多斯地区,盆地出现了长达130 Myr的沉积间断,缺失了志留系、泥盆系^[30-31]。

2 层序界面特征

2.1 层序界面识别标志

2.1.1 构造不整合面

马家沟组顶、底发育2个区域构造不整合面(古风化壳),有明显的地层缺失和角度不整合关系。底部不整合界面之下的亮甲山组顶界为含燧石条带或结核的中-细晶白云岩,并发育古喀斯特岩溶地貌及不同程度的风化粘土层^[32],是怀远运动形成的前马家沟组区

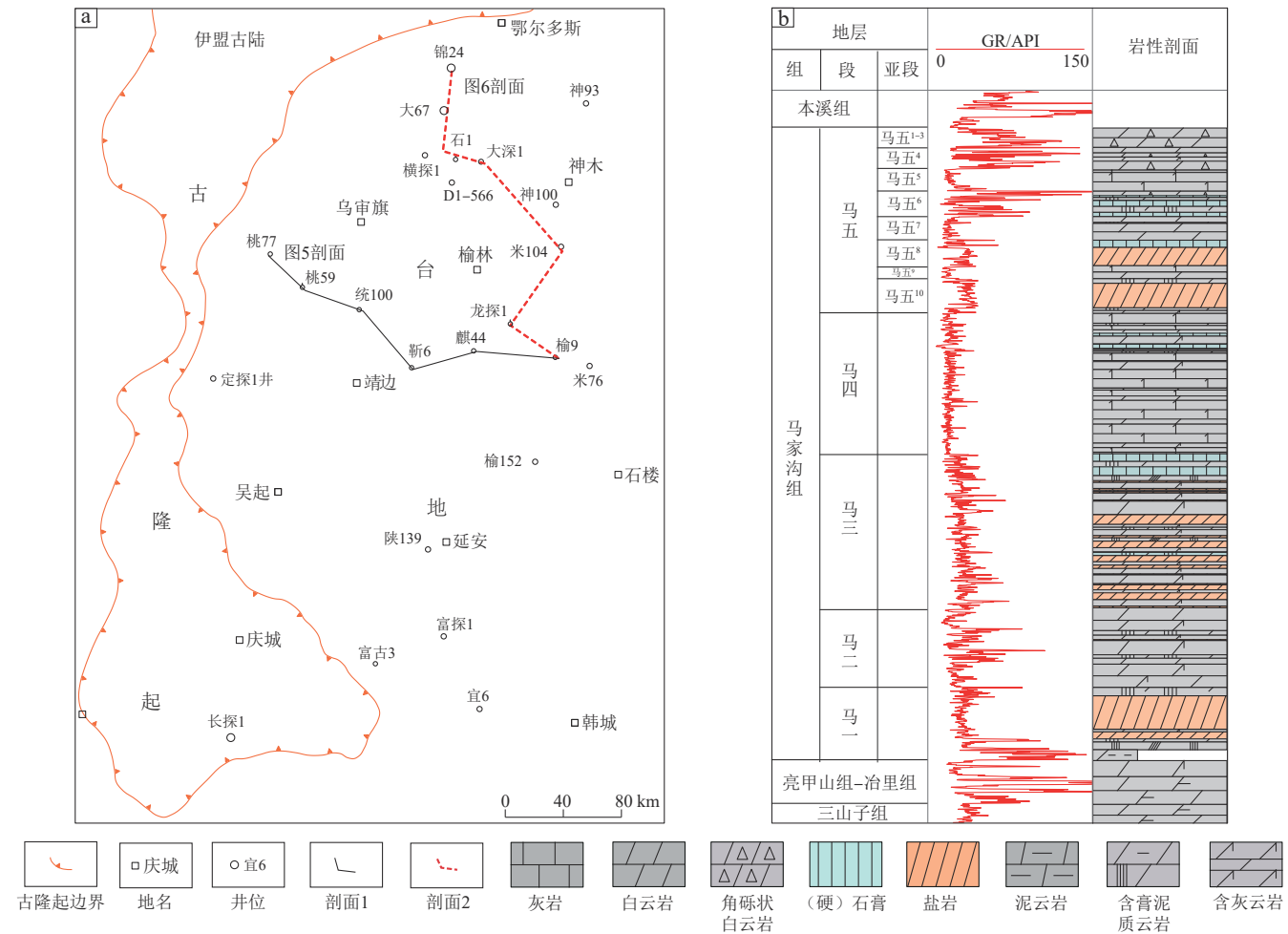


图1 鄂尔多斯盆地马五段沉积格局(a)与中、东部地层岩性柱状图(b)

Fig. 1 Sedimentary pattern and lithofacies column of the 5th member of Majiagou Formation in Ordos Basin

域不整合面,马家沟组在不同地区超覆于不同时代地层之上。上部是加里东期—海西早期构造运动形成的不整合面,石炭系直接覆盖在马家沟组之上,长时间的剥蚀造成马家沟组顶部发育大量角砾岩(图1b)和孔隙型储集体。从时限上看,中奥陶统马家沟组到上奥陶统背锅山组(盆缘区保留)是36.2 Myr^[25],结合两大区域不整合面,整个马家沟组可以划分为1个二级层序,内部的三级层序主要利用基准面变化和沉积速率所造成的沉积趋势转换所反映的层序界面进行划分。

2.1.2 沉积间断面

在连续沉积的地层中,准层序组在纵向上的进积-退积叠置方式的转换面以及其横向上其对应的古隆起边缘区沉积间断面,是层序界面识别的主要依据之一。在陆表海型碳酸盐岩-蒸发岩沉积体系中,由于蒸发岩的沉积需要比碳酸盐岩更苛刻的全球性海平面升降、构造、地球化学和气候条件,因此沉积成因、海水进退、台地不同部位的淹没与暴露对层序界面的控制较为明显。榆9井位于盆地中心,马一段、马三段和

马五段沉积厚层盐岩,石1井位于北部隆起边缘,对应层段的盐岩厚度减少,硬石膏层与泥云岩薄互层(图2),甚至变为角砾岩层。处于海退期的马一段、马三段和马五段的碳酸盐岩与蒸发岩呈现相邻而不大范围重叠的特征,古隆起边缘沉积薄层碳酸盐岩与泥质碳酸盐岩,见多层角砾岩,角砾成分为含硬石膏结核溶模孔的泥晶白云石(图3a,c),膏模孔内充填粉晶白云岩和方解石,示顶底结构(图3b,d),部分为岩溶堆积角砾岩,角砾成分多为潮坪相白云岩,砾间充填泥质和云岩碎屑(图3e)。在蒸发岩沉淀所需的饱和度下,生物碳酸盐的生产力已经大大下降,碳酸盐岩与蒸发岩之间为相带指状交叉^[14];Tucker1991年提出浅水碳酸盐岩沉积在盆地蒸发岩沉淀开始之前就停止了,甚至发生溶蚀作用^[15]。整体考虑盆地中心和盆地边缘的沉积事件,二者具有不等时性,厚层盐岩沉积时期与碳酸盐岩沉积时期不同,即在台内低洼区沉积厚层蒸发岩,特别是盐岩沉积期,广大外围区是间歇性暴露区,因此可将马一段、马三段和马五段发育蒸发岩的底部作为沉积间断面。从岩性上识别沉积间断的典型标志是盆地中

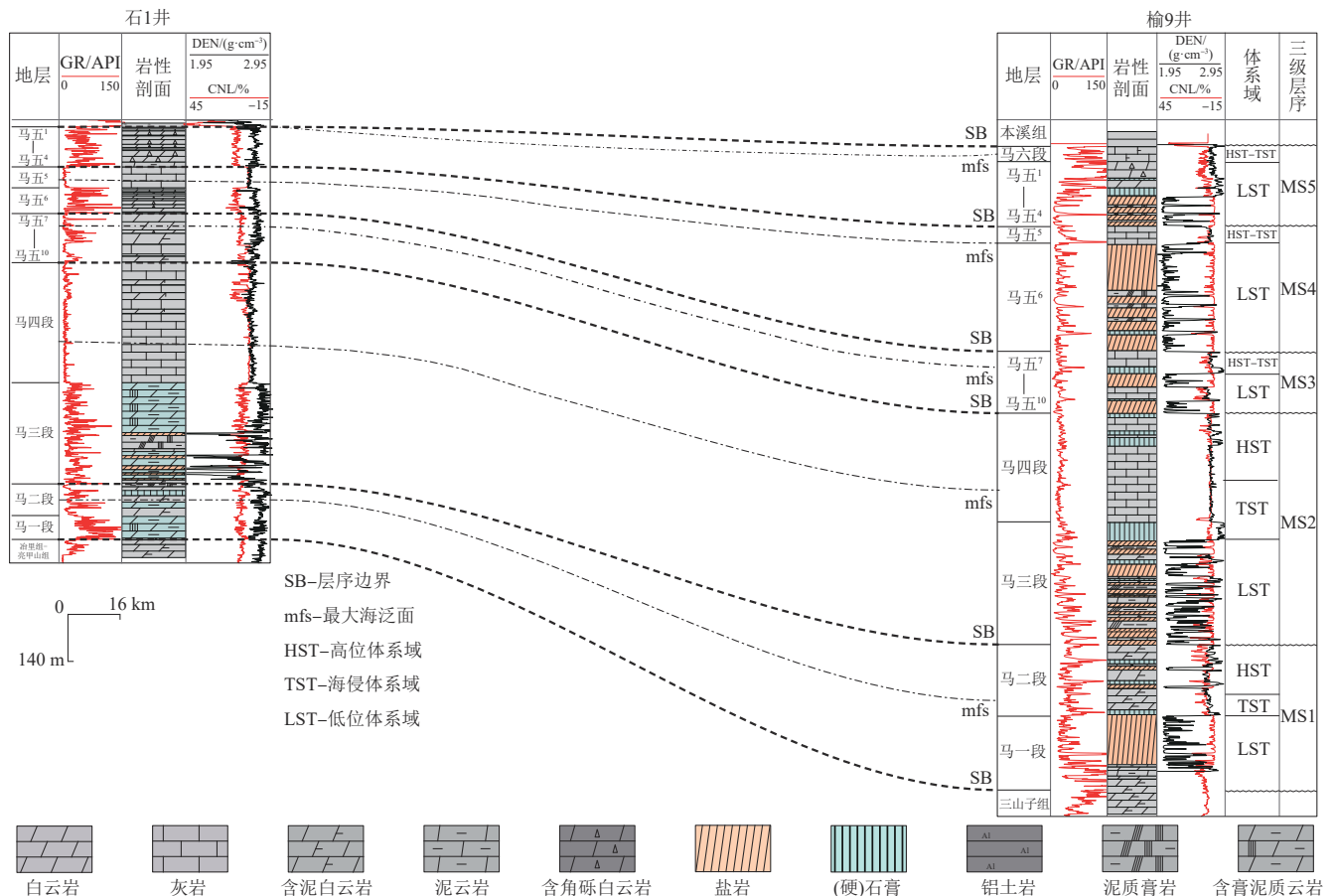


图2 鄂尔多斯盆地马家沟组盆地中心到边缘岩相与层序边界

Fig. 2 Lithofacies and sequence boundaries of Majiagou Formation from basin center to margin, Ordos Basin

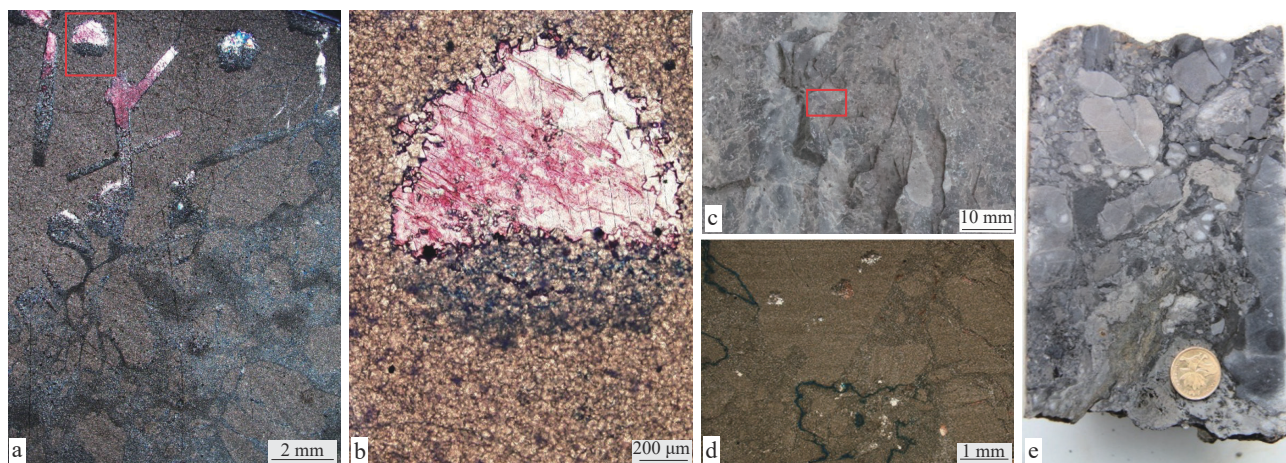


图3 鄂尔多斯盆地马家沟组顶部岩溶角砾岩特征照片

Fig. 3 Characteristics of karst breccia at the top of Majiagou Formation in Ordos Basin

a. 破碎角砾岩,砾间白云石充填,砾石内发育板状硬石膏假晶,被方解石交代,膏模孔内充填粉晶白云石和方解石,膏模孔发育区,微裂缝,牛3井,埋深2 961.76 m,马五²亚段;b. 示顶、底构造,上部方解石,下部白云质渗流粉砂,单偏光,图a方框视域;c. 岩溶角砾岩,任203井,埋深2 812.73 m,马五²亚段;d. 砾间为泥云质充填,图c方框视域;e. 堆积角砾岩,角砾成分不一,富古1井,埋深3 129.00 m,马五²亚段

心厚层盐岩和硬石膏组合的底部,古隆起边缘区发育角砾岩或薄层硬石膏与白云岩互层段的底部。在测井曲线上主要是密度值异常增大或异常减小层段的底部(图2)。

2.1.3 最大海泛面

最大海泛面的相关沉积物是划分高位体系域和海侵体系域的标志,一般是由薄层深海相沉积物组成,代表在最大海侵所能达到的位置形成的界面,准层序组由退积式转换为加积式或进积式也是识别标志。在鄂尔多斯盆地马家沟组沉积期陆表海台地型碳酸盐岩-蒸发岩层系中,由于整体地形平缓,水体较浅,最大海

泛面在盆地中心表现为灰岩、含泥灰岩沉积,纵向上处在厚层蒸发岩之上碳酸盐岩层系中;古隆起区(盆地边缘)为白云岩或泥质白云岩沉积,纵向上处于含膏云岩之上的较纯碳酸盐岩地层中(图2)。

2.2 层序地层边界类型与特征

在传统的克拉通内碳酸盐岩-蒸发岩盆地研究中,盆地早期的正常海相是碳酸盐岩沉积的时期,随着水体局限、干旱程度和盐度的逐渐增加,硫酸盐和氯化物逐次沉淀,因此产生了从碳酸盐岩到蒸发岩的沉积旋回(图4a),盆地的再次海侵启动了下一个旋回的碳酸盐岩沉积。在层序地层学研究中,层序是以相对海平

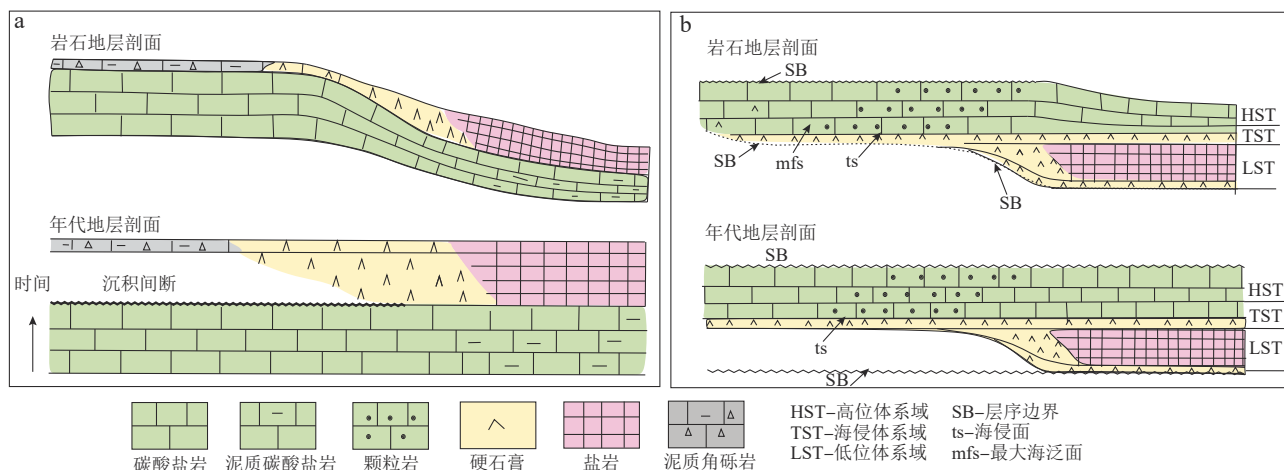


图4 碳酸盐岩-蒸发岩组合的岩石地层和年代地层示意图(据文献[15]修改)

Fig. 4 Schematic diagrams showing lithostratigraphy and chronostratigraphy for a carbonate-evaporite succession(modified after reference[15])

a. 碳酸盐岩-蒸发岩旋回;b. 蒸发岩-碳酸盐岩沉积序列

面下降而形成的层序边界来定义的,二者不能混淆^[15]。如果按照旋回概念,把边界设置在蒸发岩的顶部和下一个旋回所形成的碳酸盐岩的底部,在盆地边缘部分会包括一个时间间断(暴露间断),年代地层学剖面上表现为在一个层序内部包含一个大的沉积间断面(图4a),这不符合层序地层的定义。因此把层序边界划在下面的碳酸盐岩和上面的蒸发岩之间,即把一个蒸发岩-碳酸盐岩沉积组合的层序界面设置在蒸发岩底部和碳酸盐岩顶部(图4b),可以避免这种情况。沉积间断面就位于盆地边缘区的层序底部,即盆地边缘碳酸盐岩顶部的层序边界具有明显的时间间隔,而在蒸发岩之上的地层边界则没有,也符合层序地层学3个体系域的组成与演化。

从中奥陶世开始,鄂尔多斯盆地发生大规模海侵,广大地区发育浅水碳酸盐台地沉积^[14],受古隆起的影响,内部隆坳格局背景下的沉积分异作用明显,受干旱气候条件下蒸发作用的控制^[30],形成碳酸盐岩潮坪-潟湖-浅滩-膏盐湖沉积环境;当海平面完全下降,形成与外海隔离的局限海沉积环境,盆地中心沉积膏盐岩,而古隆起边缘的碳酸盐岩(形成于上一个旋回)完全暴露。考虑到盐岩的形成环境,当海水浓缩到原来海水体积的1/11甚至更小时^[5],盐岩才开始沉淀,广大古隆起边缘区域则为沉积间断或发生剥蚀,由此判断古隆起边缘区沉积间断范围广,因此形成I型层序边界。本区马一段、马三段和马五段在盆地中心以膏盐岩为主,在古隆起边缘广大区域为暴露面,边界之下潮坪萨布哈中发育薄层蒸发岩或含膏白云岩以及泥质角砾白云岩,均见鸟眼、收缩纹及石膏假晶,马五¹⁻⁴亚段见大量膏模孔^[33-34]。奥陶系马家沟组顶、底面为构造隆升侵蚀不整合界面,与Vail的I型层序边界相当,是盆-盆转换的时间界面;马家沟组内部的不整合面是盆地构造活动处于稳定时期,海平面升降变化形成的暴露层序界面。

3 层序格架特征和发育模式

3.1 层序地层格架特征

鄂尔多斯盆地马家沟组属于下古生界奥陶系中统大湾阶-达瑞威尔阶,地层年龄为 $(470 \pm 1.4) \sim (458.4 \pm 0.9)$ Ma,形成于11.2~12.2 Myr的时间段内^[30]。根据层序地层划分模式、岩性组合特征、盆地内和古隆起边缘地层对比,将研究区内马家沟组划分为5个三级层序,三级层序的界面分别位于马一段底、马三段底、马五段底,马五⁶亚段底和马五⁴亚段底,均

为I型层序界面。层序MS1包含马一段和马二段,马一段以蒸发岩为主,为低位体系域沉积,马二段下部白云岩段为海侵体系域,上部白云岩夹薄层膏盐岩为高位体系域。层序MS2包含马三段、马四段,该层序厚度较大,主要原因在于低位域的马三段在盆地中心区蒸发岩(盐岩)沉淀厚度大到175 m(榆9井),向古隆起边缘区逐步减薄至78 m(定探1井)。马四段为马家沟组沉积期的最大海侵期,盆地中心区水体略深,碳酸盐岩沉积速率稍小,不能与海平面的上升保持一致,以富含泥晶的灰岩沉积为主(图5),呈现出追补型沉积特征,沉积厚度在150 m(榆9井)到180 m(石1井)。而在古隆起边缘区,特别是西部中央隆起区水体浅,碳酸盐岩沉积速率快,与海平面的上升基本保持一致,形成并进型沉积,厚度超过400 m(定探1井),以滩相白云岩为主,没有广泛发育海底胶结作用。按照经典层序地层理论,马四段下部对应海进体系域,盆地中心区的马四段上部发育4层厚度4~8 m的硬石膏夹层,而在古隆起边缘区无硬石膏层,由此可以判断马四段上部为高位晚期的产物。马三段到马四段具备完整的一套体系域组合,中间没有明显的不整合面,因此划分为1个三级层序。该层序沉积厚度大,是由该阶段古构造背景、古地理环境以及由此控制的碳酸盐岩沉积速率决定。

层序MS3相当于马五⁷⁻¹⁰亚段,该层序厚度在50~100 m,马五⁷亚段对应高位域沉积,为碳酸盐岩,全区可对比。MS4由马五⁶和马五⁵两个亚段组成,之所以把马五⁵⁻⁶亚段划为一个三级层序,主要是因为马五⁶亚段沉积巨厚蒸发岩,构成本层序的低位域,其底部与马五⁷亚段的不整合特征明显;马五⁵亚段沉积期为马五段内部最大一次海侵,沉积范围广,水体明显变深,地层厚度表现出西北厚、东南薄的特点^[35-36],主要由灰岩和白云岩组成,全区分布,构成层序的海侵和高位域。MS5相当于马五⁴亚段到马六段,马六段仅残存在岩溶盆地,马五⁴亚段的膏盐岩仅残存在盆地中心的榆9、米131、麒44等井区,该层序顶部为区域不整合面,上覆地层为石炭系本溪组和太原组,强烈的岩溶作用把古隆起边缘区马五²⁻⁴亚段蒸发岩改造成准层状分布的角砾岩,如大牛地区块的钻井马五¹⁻⁴亚段残存不一,且主要为泥质角砾岩与白云岩薄互层。至伊盟古陆边缘的锦24井区,出露马四段下段(图6)。通过盆地中心与古隆起边缘区探井的层序界面识别、层序划分与对比,确保该划分方案的一致性及合理性。该划分方案体现整个盆地在蒸发岩模式和碳酸盐岩模式之间切换,也体现1个标准三级层序的旋回性和阶段性。

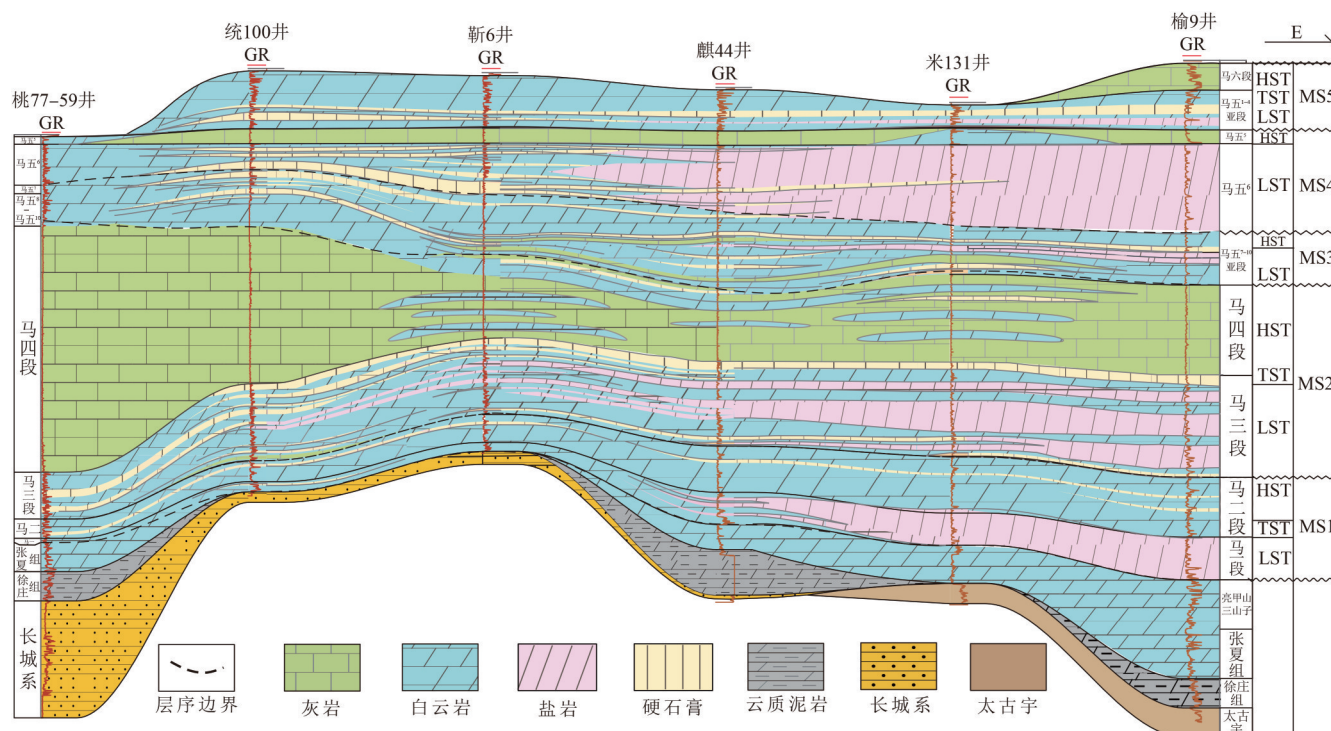


图5 鄂尔多斯盆地马家沟组东西向岩性剖面与层序地层格架(剖面位置见图1)

Fig. 5 Lithostratigraphy and sequence stratigraphy framework of the Majiagou Formation, Ordos Basin (E-W)

(see Fig. 1 for the location of this E-W oriented section)

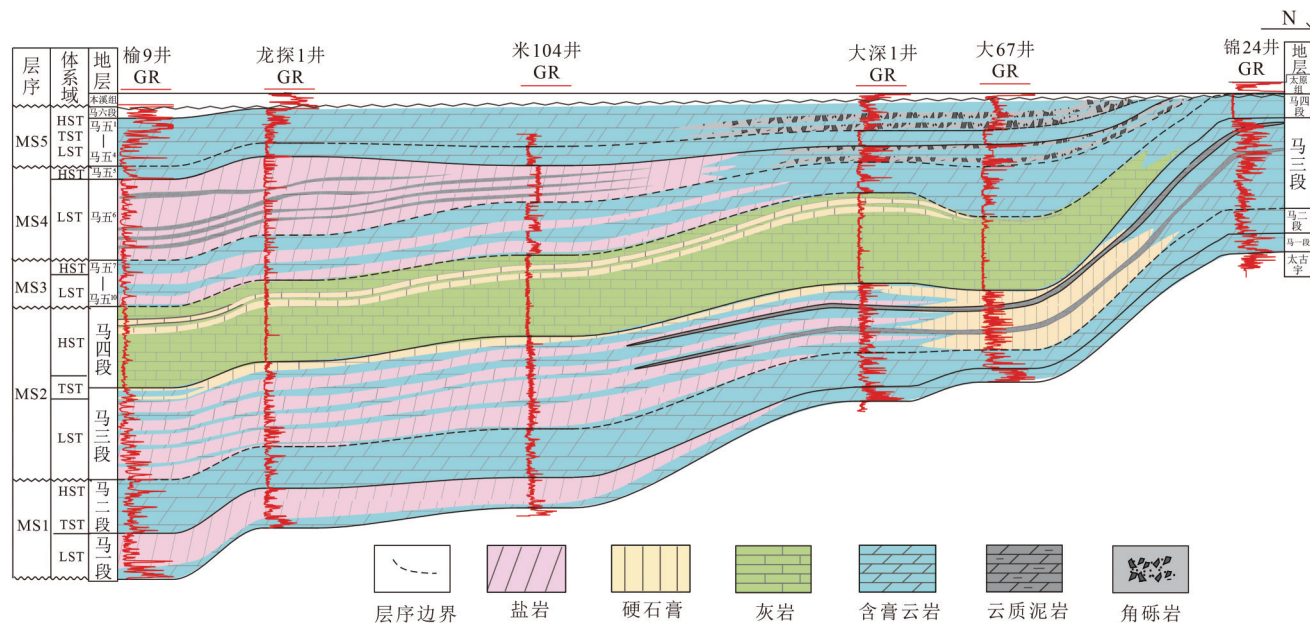


图6 鄂尔多斯盆地马家沟组南北向岩性剖面与层序地层格架(剖面位置见图1)

Fig. 6 Lithostratigraphy and sequence stratigraphy framework (MS1-5) of Majiagou Formation, Ordos Basin (S-N)

(see Fig. 1 for the location)

3.2 碳酸盐岩-蒸发岩层序地层模式

综合马家沟组沉积期碳酸盐岩台地的形态,岩相分布和演化特征及层序边界的划分,提出马家沟组三

级层序地层学模式(图4b)。蒸发岩层段主要分布在层序下部,沉积于低位体系域和海侵体系域早期,主要分布在盆地坳陷中心区(低位盐岩和石膏)和坳陷边缘(低位楔状石膏)。以MS1为例,马一段沉积期海水缓

慢侵入,水体浅,气候干旱,中心区形成膏盐湖沉积,古陆边缘区发育混积潮坪相泥质云岩、含石英泥质白云岩等。海平面处于从最低到缓慢上升的阶段,因此将马一段定为低位体系域是恰当的,其底部是怀远运动造成的亮甲山与马家沟组的I型不整合面^[35]。浅水碳酸盐岩赋存于层序上部,是盆地海侵和高位体系域的沉积。马二段沉积期海水进一步侵入,整体为局限-半局限环境,台内坳陷区为中-厚层碳酸盐岩夹中-薄层膏盐、膏质云岩和泥质膏云岩层,如榆9井马二段厚度为102 m,以灰岩为主,夹薄层盐岩和硬石膏,盐岩厚度1~5 m,说明海侵-高位期内发育四级海退,沉淀了薄层蒸发岩。在高位早期,碳酸盐进积达到峰值;高位晚期,中薄层蒸发岩(主要是硬石膏)可能沉积在台地内部,如马四段(米131、榆9等井),而靠近古隆起区则无蒸发岩沉积。随后是相对的海平面下降,碳酸盐岩台地完全暴露,形成层序边界,并启动下一个层序,盆地中出现另一阶段的蒸发岩。该层序地层模式主要是台地形态、相对海平面变化、沉积速率、碳酸盐岩与蒸发岩沉积所需环境等综合作用的结果。

3.3 碳酸盐岩和蒸发岩之间的成因关系

三级层序内部高频层序(四级-五级)所形成的岩相变化与短期沉积间断可以很好解释碳酸盐岩和蒸发岩之间动态的地层关系。在海退期,马家沟组岩相的分布从盆地中心向周缘依次为盐岩、石膏岩、碳酸盐岩,呈近于同心圆状的“牛眼式”分布模式,说明水体经历过与外海完全隔绝的干化蒸发阶段。榆9井马五⁶亚段厚度为154 m,盐岩厚度140 m。按照1 000 m海水蒸发可形成6 m蒸发岩^[5],那么巨厚的盐岩必然是海平面频繁升降、沉积环境封闭、蒸发与半开放交替、物质得

以补充这种不断循环的形式才能形成。用回灌重溶机理可以解释了每次海侵时先溶蚀早期的盐岩,难溶杂质保留形成溶积层-黑色泥质薄层的现象。统计榆9井马家沟组400 m蒸发岩中有79层^[28],可利用泥岩夹层的层数推知淡化的期次及相应的海平面变化规律。

在1个三级层序的低位体系域中,以层序MS4中的低位域马五⁶亚段为例,盆地中心主要沉积厚层蒸发岩,古隆起边缘区主要沉积中薄层状的碳酸盐岩,从连井岩性剖面上看(图7a),二者在三级层序的低位期时间段内是等时的,这也是以三级层序的体系域为沉积相编图单元的根本原因。但从蒸发岩和碳酸盐岩沉积原理可知,蒸发岩形成于次级海退期的盆地中心,而碳酸盐岩形成于次级海侵期古隆起边缘区,在短时间内,二者在时空上是没有接触、不等时的,即碳酸盐岩和蒸发岩之间的地层关系是动态的,蒸发岩沉积的侧向碳酸盐岩多是薄层的,或更典型的是侵蚀或不沉积的间断面(图7b)。由此可判断蒸发岩沉积的次数与隔离次数相关,与相邻碳酸盐岩地层中不沉积或间断(不整合)的次数一致。蒸发岩周缘的碳酸盐岩中间发育多期沉积间断,在碳酸盐岩-蒸发岩层系中,四-五级的沉积间断面持续时间长,范围广,是层间溶蚀发育的前提条件。这种快速但间歇性的碳酸盐岩沉积作用的原理,可以解释碳酸盐岩中的厚度和地层关系^[37]。

4 层序地层对储层与烃源岩的控制

4.1 对储集体的控制作用

一般而言,较大级别(一级到二级)的层序界面与不整合面对应,主要控制规模性岩溶储层的形成,而

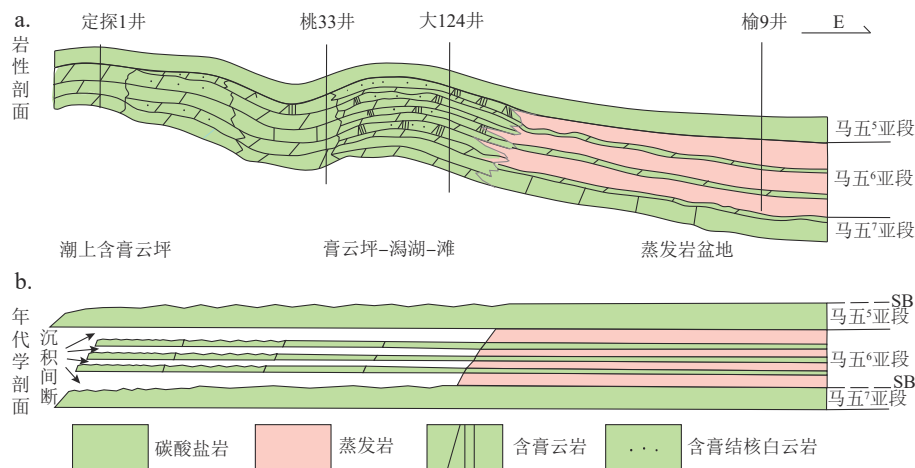


图7 鄂尔多斯盆地马家沟组层序MS4中低位体系域的岩性剖面(a)与年代地层剖面(b)示意图

Fig. 7 Lithologic and chronostratigraphic profiles of lowstand systems tract in sequence MS4, Mjiagou Formation, Ordos Basin

四级和五级层序界面由于暴露时间短,在缺乏后期成岩改造的情况下难以形成规模性储层^[38],大型不整合面是控制碳酸盐岩岩溶型储层发育的关键,如塔里木盆地和鄂尔多斯盆地奥陶系顶部发育风化壳岩溶型储集体,形成了中国重要的油气聚集领域。对于鄂尔多斯盆地马家沟组蒸发岩-碳酸盐岩层系,在低位期,古隆起边缘碳酸盐岩发生广泛白云石化作用,在此特定环境中沉积的细粉晶白云岩和含硬石膏结核白云岩是储层发育的物质基础^[39]。马五¹⁻⁴亚段主要发育膏模孔和晶间溶孔两类主要储集空间类型,与裂缝组合形成不同的储层类型,具有层多、层薄的特征。马五⁵亚段之下的马五⁶、马五⁷、马五⁹亚段储集层岩性主要为颗粒白云岩和粉-细晶白云岩,储集空间均以溶蚀孔洞为主,次为残余粒间孔、晶间溶孔、晶间孔和微裂缝^[40]。因此层序界面及内部次级间断面或高频层序

界面结合沉积微相对储层形成的影响较大,再叠加风化壳岩溶可形成多层系复合岩溶系统。

从碳酸盐岩和蒸发岩之间动态的地层关系可知,在三级层序内部的低位域阶段,在古隆起边缘存在沉积间断或高频层序界面,发生早期溶蚀作用。从位于古隆起边缘区的大牛地区块的大D1-566井马五段全井段岩心观察看(图8a),奥陶系顶部不整合面之下为马五³⁻⁴亚段,主要为泥质角砾岩夹薄层白云岩,靠近不整合面,受岩溶改造强烈,是白云岩与硫酸盐岩复合古岩溶的结果^[40]。马五⁵亚段为深灰色含云灰岩和灰岩组成,岩石致密,偶见裂缝,被方解石充填,岩溶改造弱,一般认为是区域隔挡层。该井马五⁶亚段主要为泥质角砾岩和白云岩互层,厚度38 m,岩心刻度测井可知高GR值层段全部为泥质角砾岩,角砾屑为微晶白云岩和细粉晶白云岩,未见含硬石膏结核白云岩,角砾屑

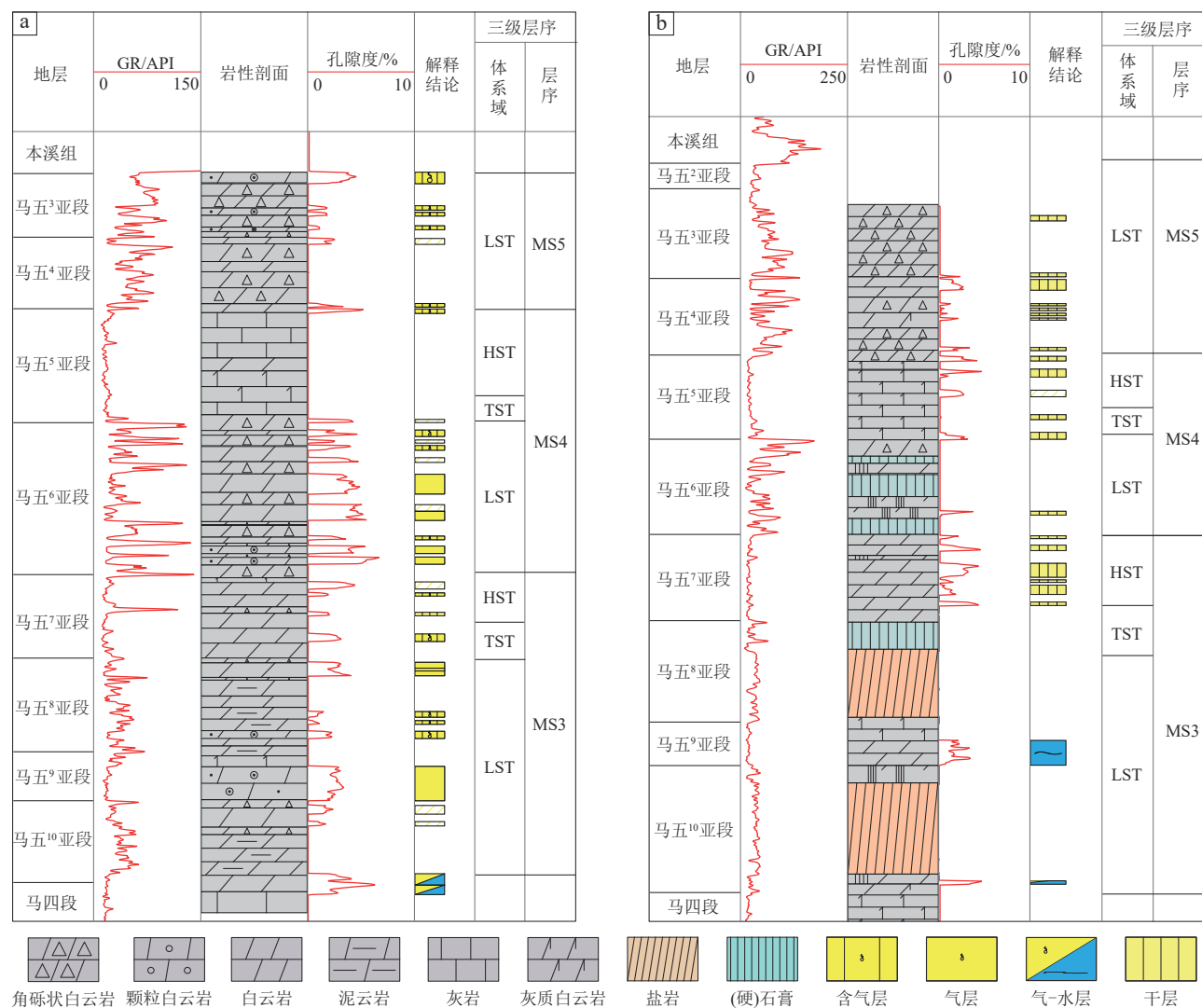


图8 鄂尔多斯盆地D1-566井(a)和神100井(b)马五段层序与储层柱状图

Fig. 8 Sequence stratigraphy and reservoir column of Ma5 in wells D1-566 (a) and Shen100 (b), Ordos Basin

共有9层,白云岩层段为块状和纹层状白云岩,呈现原始产状,这与典型岩溶洞穴充填特征差异较大。马五⁶亚段的储层呈薄层,单层厚度1~4 m,孔隙度3%~7%,与角砾呈互层状分布,远离不整合面的马五⁷亚段、马五⁹亚段仍发育中-薄层储层。

合理的解释是,在低位期处于暴露面之下靠近盆缘区(古隆起区)的中-薄层膏盐岩、膏质云岩和白云岩发生层间溶蚀,由于石膏溶解速率远远大于白云岩^[5,40],膏岩和膏质云岩溶蚀程度大,形成的溶蚀角砾岩呈层状原地堆积,在靖边气田也存在多层准层状分布的角砾岩。推测该井区马五⁶亚段在总的低位背景下小级别海侵沉积了蒸发岩和碳酸盐岩,但在随后的海退期暴露溶蚀,在高频层序上部形成了角砾岩层,马五¹⁻⁴亚段的角砾岩层更为发育,是叠加了不整合岩溶、层间岩溶的结果,因此角砾岩层主要分布在同期沉积蒸发岩的外围。而靠近盆地中心区的钻井,如神100井马五⁶亚段残存中薄层硬石膏(图8b),盆地中心区的榆9井和龙探1井的该段发育厚层盐岩,上部马五²⁻³亚段仍存在硬石膏层,说明未经过早期暴露,未发生层间岩溶作用,白云岩层物性较差。因此,准同生期多期次高频海进-海退旋回导致易溶组分暴露溶蚀^[41],对次生孔隙发育具有重要影响。其发育部位与同期古地貌格局、多级层序位置、海进海退程度及沉积微相密切相关,白云岩尤其是滩相云岩和潮坪相含石膏结核的白云岩经早期溶蚀形成优质储层。四川盆地寒武统龙王庙组也存在同样的储层发育机制,即四级和五级层序控制着有利沉积微相的分布,在高频海平面下降和干旱气候条件下的准同生白云化作用和早期溶蚀作用所形成的早期孔隙显著影响后期储层改造程度^[42-43]。同样,塔里木盆地巴楚-塔中地区下寒武统盐下颗粒滩相白云岩有效储层,其准同生期岩溶改造也是储集物性发育的重要条件^[44]。但是,在三级层序低位体系域等时格架内,碳酸盐岩与蒸发岩(特别是发育厚层盐岩)层系中的盐湖周缘区或古隆起区,高频层序界面所造成的早期暴露溶蚀作用时间更长,范围更广,且存在易溶蒸发岩,对储层的改造更明显。

综上所述,早期几乎从盐岩沉淀的时间开始,古隆起边缘区就存在部分或完全溶解的可能性,尤其是可溶性较强的蒸发岩。这意味着大多数古老的蒸发岩沉积显示出明显的变薄迹象,特别是在厚层蒸发岩序列边缘,那里最有可能发生大气水的影响^[5]。如果蒸发岩完全溶蚀,残留物为酸不溶物层或薄层溶蚀角砾岩。正确识别和恢复该过程,对于认识整个盆地历史和构造演化过程以及储层的分布十分重要。马家沟组的厚

层蒸发岩仍保留在盆地中心,推测盆地边缘带的溶蚀程度大,这为储层的分布预测提供了方向。

4.2 对烃源岩的控制作用

鄂尔多斯盆地米探1井在奥陶系马四段取得了天然气勘探新发现^[45],大牛地区块的大深1井、小壕1等均试获天然气。基于气源对比分析,认为盆地东部马四段天然气来自于马家沟组海相烃源岩^[46],钻井揭示烃源岩常与硬石膏岩伴生,岩性为深灰色-黑灰色泥质白云岩或白云质泥岩。总有机碳含量(TOC)介于0.22%~1.61%,平均值为0.40%,最高值可达3.42%。有机质以腐泥型为主,生烃母质主要为浮游藻类,为腐泥型干酪根^[46],证实鄂尔多斯盆地东部马四段天然气藏为奥陶系盐下自生自储油型气藏。该套烃源岩受沉积相控制,主要沿地势相对较低的桃利庙坳陷和米脂坳陷规模分布^[47],特点是单层厚度介于0.1~1.0 cm,累计厚度介于10.0~40.0 m^[48]。姚涇利统计了马五⁶亚段-马五¹⁰亚段烃源岩岩心样品,有机质丰度整体偏低,TOC平均为0.2%,在靖边附近和吴起-志丹一带,TOC大于0.2%,在0.2%~0.5%^[49],与马一段-马三段的有机碳含量有一定差异。尽管碳酸盐岩-蒸发岩沉积组合中的烃源岩的TOC低,但是硫酸盐矿物对高演化阶段烃源岩的生烃具有促进作用,通过恢复得到实际的TOC可达1.2%,属中等烃源岩^[50-54]。

在陆表海台地型碳酸盐岩-蒸发岩层系中,烃源岩主要发育在低位体系域,具有明显的层控性和相控性。在海侵期到高位期,碳酸盐岩沉积速率大,主要沉积较纯碳酸盐岩,烃源岩不发育,如马四段、马五⁵亚段、马五⁷亚段、马五⁹亚段,均为较纯的碳酸盐岩。而在低位体系域的次级海退期早期,海平面下降到一定程度时,西南部的庆阳古隆起出露地表,西北部的伊盟古陆提供陆源营养元素输入,在水体变咸的环境下,发育嗜盐微生物,有机质产率高,水体盐度周期性变化,可造成不同生物群落的周期性繁殖和死亡,从而为盐湖周缘洼地及盐湖斜坡区提供丰富的有机质来源。烃源岩主要分布在低位期的马一段、马三段、马五⁶亚段、马五⁸亚段、马五¹⁰亚段;次级海退晚期,超高浓度的卤水在短时期内形成了密度分层,阻止了水体循环,造成了强还原环境,洼地内蒸发岩沉淀,有利于有机质的保存;而潮坪区则处于暴露状态,发生溶蚀作用,部分膏盐发生溶解,薄层白云岩坍塌堆积形成角砾岩。如此反复,形成单层薄、与膏质泥质云岩频繁互层烃源岩发育段(图9)。

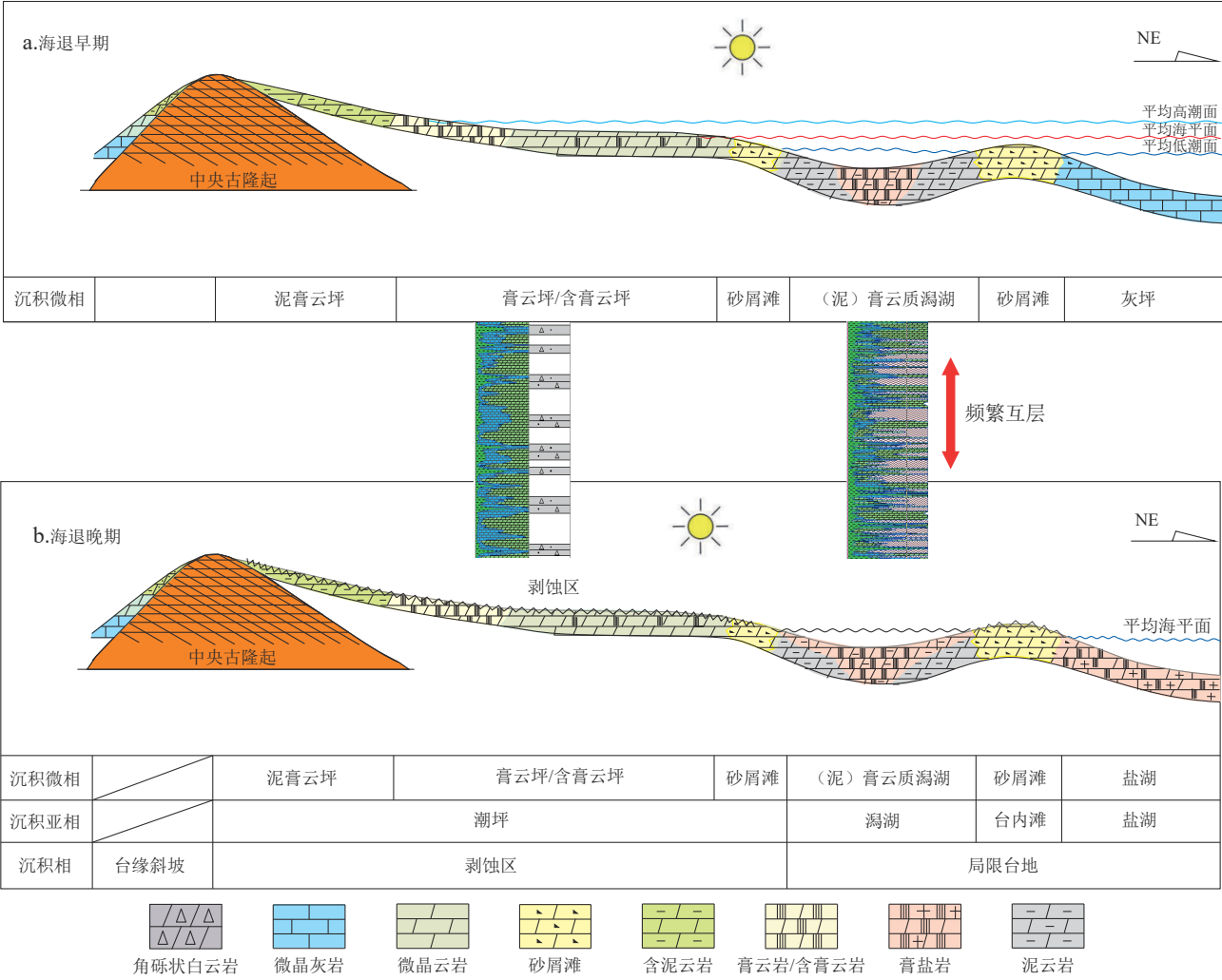


图9 鄂尔多斯盆地马家沟组与蒸发岩相关层系烃源岩形成与保存模式

Fig. 9 Schematic pattern diagram of formation and preservation of source rocks in sequences related to evaporates within the Majiagou Formation, Ordos Basin

马三段蒸发岩分布范围比马五段范围大(图5, 图6), 榆9井—龙探1井—米104井—大深1井的马三段为盐岩, 且盐岩含量逐步减少, 到大67井区变为硬石膏, 再向北的锦24井不发育蒸发岩; 而马五⁶亚段的蒸发岩从榆9井到米104井减薄, 到大深1井区蒸发岩消失, 变为泥质角砾岩夹白云岩。分析主要原因是马二段沉积期, 海水缓慢海侵(马二段内部发育薄层硬石膏和膏质云岩), 沉积范围广, 之后进入马三段缓慢的海退阶段, 期间频繁的次级海侵与海退旋回, 造成蒸发岩分布范围大, 特别是本段盐岩的分布范围大, 有机质未被破坏, 再加上马四段又是最大海侵, 沉积厚层碳酸盐岩, 马三段的烃源岩层得以保存。马五段盐岩沉积范围小, 马五⁶亚段的盐岩主要分布米104井—麒44井—榆152井—米76井所圈定的范围内, 厚度大, 盐岩中间夹层薄(榆9井和龙探1井区), 说明短暂海侵, 补充物

质, 又进入蒸发浓缩盐岩沉淀阶段, 因此在盐岩和厚层石膏沉淀区之外存在大范围的沉积间断, 而且间断次数多(图9), 前期所沉积的有机质遭到破坏, 马五段所测有机碳含量低, 有机质主要保存在盐湖周边的洼陷中, 这是马三段和马一段蒸发岩层系烃源岩分布面积和有机碳含量均大于马五段的主要原因。综合烃源岩形成模式和三级层序低位域烃源岩分布特征, 提出马家沟组有效烃源主要发育在碳酸盐岩和蒸发岩过渡期的盐湖周缘洼地和盆地盐湖中心斜坡区(图10)。

5 结论

1) 发育厚层盐岩的碳酸盐岩—蒸发岩层系的层序地层划分方案要兼顾盆地边缘和盆地中心岩相组合特征, 从更广的角度看待整个盆地沉积演化事件, 采用蒸

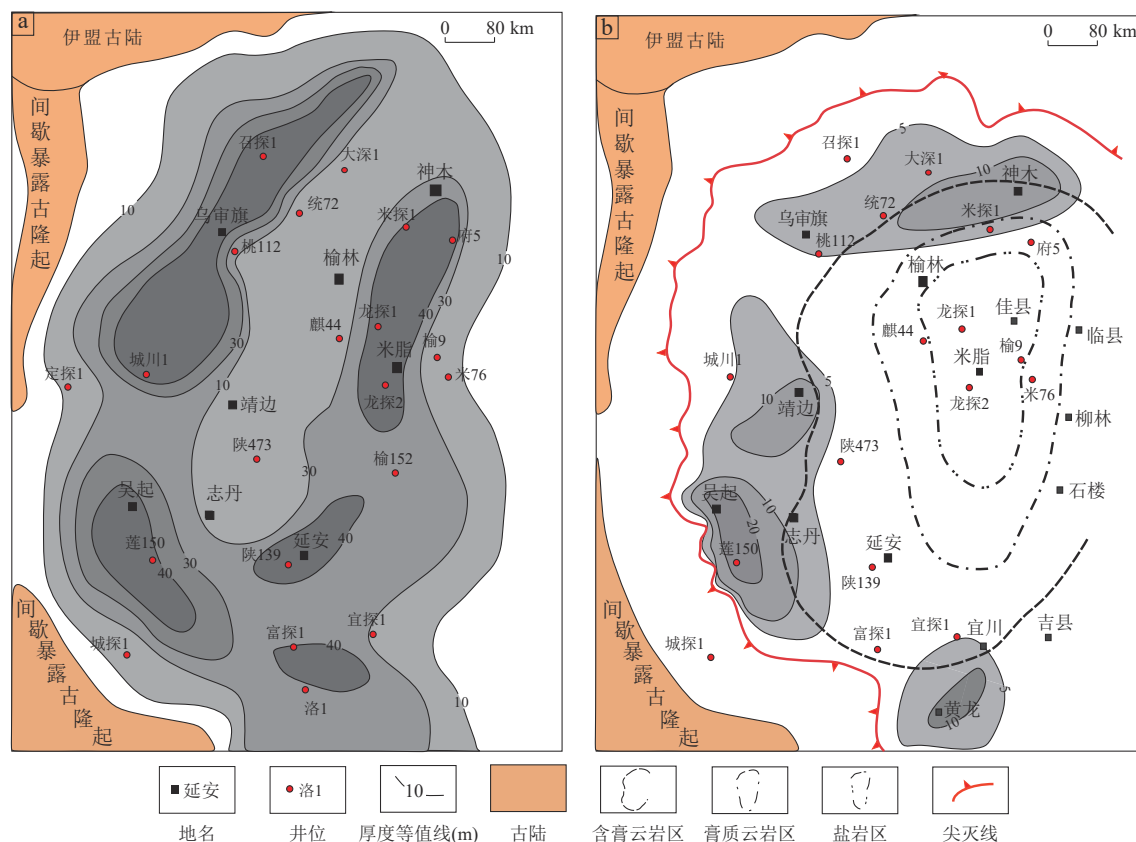


图10 鄂尔多斯盆地东部马三段-马一段(a)和马五段(b)烃源岩厚度分布与蒸发岩分布(改编自文献[9,48-49])

Fig. 10 Isopach of source rock and evaporite distribution of Ma3–Ma1 (a) and Ma5 (b) members in eastern Ordos Basin (modified after references [9, 48–49])

发岩层段位于层序下部,碳酸盐岩层段位于层序上部的顺序来考虑碳酸盐岩-蒸发岩层系的层序地层划分方案更合乎逻辑,据此模式将马家沟组划分为5个三级层序。该划分方案体现碳酸盐岩和蒸发岩沉积模式在整个盆地的时空分布,也体现1个标准三级层序的旋回性和阶段性。

2) 碳酸盐岩和蒸发岩之间的地层关系是动态的,在三级层序低位域的短时限内,碳酸盐岩和蒸发岩在时空上呈指状交叉,蒸发岩沉积的次数与相邻碳酸盐岩地层中无沉积或间断(不整合)的次数相关,这种四级-五级的沉积间断面范围广,是层间溶蚀发育的前提条件,同时也决定了盐间烃源岩的发育位置。

3) 古隆起边缘区碳酸盐岩广泛白云岩化、层序界面及低位体系域内部的多个次级沉积间断面所引发的层间岩溶、碳酸盐岩与蒸发岩的差异溶蚀及沉积微相分异是马家沟组储层发育的主要控制因素。依据马家沟组内蒸发岩发育的层位和范围,可以推测靠近古隆起区的溶蚀程度大,为储层的分布预测指出了方向。

4) 海退期早期,盐湖周缘洼地及盐湖斜坡区发育
烃源岩,次级海退晚期,洼地内蒸发岩沉淀,有机质得

以保存,在碳酸盐岩-蒸发岩层系内可以形成单层薄、与膏质泥质云岩频繁互层的烃源岩发育段。

致谢:感谢审稿专家为本文质量的提升所提出的诸多建设性意见!

参考文献

- [1] XIAO Di, CAO Jian, TAN Xiucheng, et al. Marine carbonate reservoirs formed in evaporite sequences in sedimentary basins: A review and new model of epeiric basin-scale moldic reservoirs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 223: 103860.
- [2] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(4): 1-15.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng, et al. Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(4): 1-15.
- [3] 苏成鹏, 何莹, 宋晓波, 等. 四川盆地川西气田中三叠统雷口坡组气藏气源再认识[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 341-352.
SU Chengpeng, HE Ying, SONG Xiaobo, et al. Reinterpretation of gas sources in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan gas field, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas*

- Geology, 2022, 43(2): 341–352.
- [4] 张满郎, 郭振华, 张林, 等. 四川安岳气田龙王庙组颗粒滩岩溶储层发育特征及主控因素[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 235–248.
- ZHANG Manlang, GUO Zhenhua, ZHANG Lin, et al. Characteristics of and main factors controlling the karst shoal reservoir of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the Anyue Gas Field, central Sichuan Basin, China [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 235–248.
- [5] WARREN J K. Evaporites: A geological compendium [M]. Cham: Springer, 2016: 86–185.
- [6] 钟逸斯, 王立成, 董浩伟. 蒸发岩沉积特征及环境综述[J]. 沉积学报, 2022, 40(5): 1188–1214.
- ZHONG Yisi, WANG Licheng, DONG Haowei. Evaporite sedimentary characteristics and environment: A review [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1188–1214.
- [7] 文华国, 霍飞, 郭佩, 等. 白云岩—蒸发岩共生体系研究进展及展望[J]. 沉积学报, 2021, 39(6): 1321–1343.
- WEN Huaguo, HUO Fei, GUO Pei, et al. Advances and prospects of dolostone-evaporite paragenesis system [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(6): 1321–1343.
- [8] PRINCE J K G, RAINBIRD R H, WING B A. Evaporite deposition in the mid-Neoproterozoic as a driver for changes in seawater chemistry and the biogeochemical cycle of sulfur [J]. Geology, 2019, 47(4): 375–379.
- [9] 胡安平, 沈安江, 杨翰轩, 等. 碳酸盐岩—膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 916–928.
- HU Anping, SHEN Anjiang, YANG Hanxuan, et al. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 916–928.
- [10] 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 849–862.
- LIN Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 849–862.
- [11] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 535–541.
- JIANG Zaixing. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: The present and the future [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 535–541.
- [12] CATUNEANU O, ABREU V, BHATTACHARYA J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1/2): 1–33.
- [13] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源—汇系统理论内在关联性 with 差异性[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 763–776.
- ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 763–776.
- [14] SCHLAGER W. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy [M]. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2005: 105–142.
- [15] TUCKER M E. Sequence stratigraphy of carbonate-evaporite basins: Models and application to the Upper Permian (Zechstein) of northeast England and adjoining North Sea [J]. Journal of the Geological Society, 1991, 148(6): 1019–1036.
- [16] 张军涛, 金晓辉, 谷宁, 等. 鄂尔多斯盆地北部地区马家沟组岩溶储层的差异性和发育模式[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1159–1168.
- ZHANG Juntao, JIN Xiaohui, GU Ning, et al. Differences and development patterns of karst reservoirs in Majiagou Formation, northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1159–1168.
- [17] 贾振远, 蔡华, 蔡忠贤, 等. 鄂尔多斯地区南缘奥陶纪层序地层及海平面变化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(5): 491–503.
- JIA Zhenyuan, CAI Hua, CAI Zhongxian, et al. Sequence stratigraphy and sea level change of the Ordovician in the southern margin of Ordos region [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(5): 491–503.
- [18] 朱创业. 陕甘宁盆地奥陶统马家沟组层序地层与天然气的关系[J]. 岩相古地理, 1999, 19(5): 47–52.
- ZHU Chuangye. Sequence stratigraphy and its bearings on the gas accumulation in the Lower Ordovician Majiagou Formation, Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1999, 19(5): 47–52.
- [19] 田景春, 彭军, 覃建雄, 等. 长庆气田中区“马家沟组”高频旋回层序地层学分析[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 31–34.
- TIAN Jingchun, PENG Jun, QIN Jianxiong, et al. Analysis of high-frequency cycle sequence stratigraphy of Majiagou Formation in middle area of Changqing Gas Field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(1): 31–34.
- [20] 姚涇利, 赵永刚, 雷卞军, 等. 鄂尔多斯盆地西部马家沟期层序岩相古地理[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(1): 33–37.
- YAO Jingli, ZHAO Yonggang, LEI Bianjun, et al. Sequence lithofacies paleogeography of western Ordos Basin in Majiagou stage, Ordovician [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(1): 33–37.
- [21] 雷卞军, 付金华, 孙粉锦, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组层序地层格架研究——兼论陆表海沉积作用和早期成岩作用对相对海平面变化的响应[J]. 地层学杂志, 2010, 34(2): 145–153.
- LEI Bianjun, FU Jinhua, SUN Fenjin, et al. Sequence stratigraphy of the Majiagou Formation, Ordos Basin: Sedimentation and early diagenesis related to eustatic sea-level changes [J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(2): 145–153.
- [22] 苏中堂, 陈洪德, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯地区马家沟组层序岩相古地理特征[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 623–633.
- SU Zhongtang, CHEN Hongde, OUYANG Zhengjian, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Geology in China, 2012, 39(3): 623–633.

- [23] 郭彦如, 赵振宇, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 44-60.
GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, XU Wanglin, et al. Sequence stratigraphy of the Ordovician system in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 44-60.
- [24] 王英民. 对层序地层学工业化应用中层序分级混乱问题的探讨[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 9-15.
WANG Yingmin. Analysis of the mess in sequence hierarchy applied in the industrialized application of the sequence stratigraphy[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 9-15.
- [25] 孟祥化, 葛铭. 中朝板块层序、事件和演化[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 283-285.
MENG Xianghua, GE Ming. Evolution of sequence events in the Sino-Korean plate[M]. Beijing: Science Press, 2004: 283-285.
- [26] 付金华, 郭彦如, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2020: 27-32.
FU Jinhua, GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, et al. Lithofacies paleogeography of Ordovician sequence in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020: 27-32.
- [27] 吴东旭, 孙六一, 周进高, 等. 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组白云岩储层特征及成因[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 51-62.
WU Dongxu, SUN Liuyi, ZHOU Jingao, et al. Characteristics and genesis of the Ordovician Kelimoli dolomite reservoirs in the western edge of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 51-62.
- [28] 包洪平, 杨承运, 黄建松. “干化蒸发”与“回灌重溶”——对鄂尔多斯盆地东部奥陶系蒸发岩成因的新认识[J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 279-288.
BAO Hongping, YANG Chengyun, HUANG Jiansong, et al. “Evaporation drying” and “reinflusing and redissolving”——a new hypothesis concerning formation of the Ordovician evaporites in eastern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(3): 279-288.
- [29] 施立志, 王卓卓, 张永生, 等. 陕北盐盆奥陶系马家沟组沉积相特征与沉积演化[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2122-2133.
SHI Lizhi, WANG Zhuozhuo, ZHANG Yongsheng, et al. Sedimentary facies and evolution of the Ordovician Majiagou Formation in salt basin of Northern Shaanxi[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(11): 2122-2133.
- [30] 李文厚, 陈强, 李智超, 等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 85-100.
LI Wenhui, CHEN Qiang, LI Zhichao, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Paleozoic in Ordos area[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 85-100.
- [31] 李振宏, 胡健民. 鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 640-647, 655.
LI Zhenhong, HU Jianmin. Structural evolution and distribution of paleokarst reservoirs in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 640-647, 655.
- [32] 李相博, 王宏波, 黄军平, 等. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面特征及油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1043-1055.
LI Xiangbo, WANG Hongbo, HUANG Junping, et al. Characteristics of unconformity resulted from Huaiyuan Movement in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1043-1055.
- [33] SARG J F. The sequence stratigraphy, sedimentology, and economic importance of evaporite-carbonate transitions: A review [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1/2): 9-34.
- [34] 何江, 赵忠军, 乔琳, 等. 白云岩储层中蒸发矿物的赋存形式与成因演化——以鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 659-666.
HE Jiang, ZHAO Zhongjun, QIAO Lin, et al. Occurrence, genesis and evolution of evaporite minerals in dolomite reservoir: A case study of the Majiagou Formation in gas fields of the central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 659-666.
- [35] 王妍. 鄂尔多斯富县及邻区马家沟组层序地层与岩相古地理研究[D]. 西安: 西北大学, 2014: 9-13.
WANG Yan. Research on the sequence stratigraphy and lithofacies paleogeography of the Majiagou Formation in Fuxian and adjacent areas[D]. Xi'an: Northwest University, 2014: 9-13.
- [36] 付金华, 吴兴宁, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组中组合岩相古地理新认识及油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 9-16.
FU Jinhua, WU Xingning, SUN Liuyi, et al. New understandings of the lithofacies paleogeography of the middle assemblage of Majiagou Fm in the Ordos Basin and its exploration significance [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 9-16.
- [37] WILSON J L. Carbonate facies in geologic history [M]. New York: Springer, 1975: 15-16.
- [38] 何治亮, 高志前, 张军涛, 等. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储层形成与分布的控制[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 853-859.
HE Zhiliang, GAO Zhiqian, ZHANG Juntao, et al. Types of sequence boundaries and their control over formation and distribution of quality carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 853-859.
- [39] 于洲, 丁振纯, 王利花, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段膏盐下白云岩储层形成的主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1213-1224.
YU Zhou, DING Zhenchun, WANG Lihua, et al. Main factors controlling formation of dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer in the 5th member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1213-1224.
- [40] 何江. 白云岩与硫酸盐岩复合古岩溶型储层评价预测——以鄂尔多斯盆地马家沟组为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 36-77.
HE Jiang. Evaluation on composite paleokarst reservoir of dolomite and sulphate rock——A case study of the Majiagou Formation in Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 36-77.
- [41] 付斯一, 张成弓, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组五段盐下白云岩储集层特征及其形成演化[J]. 石油勘

- 探与开发, 2019, 46(6): 1087-1098.
- FU Siyi, ZHANG Chenggong, CHEN Hongde, et al. Characteristics, formation and evolution of pre-salt dolomite reservoirs in the fifth member of the Ordovician Majiagou Formation, mid-east Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1087-1098.
- [42] 高达, 胡明毅, 李安鹏, 等. 川中地区龙王庙组高频层序与沉积微相及其对有利储层的控制[J]. *地球科学*, 2021, 46(10): 3520-3534.
- GAO Da, HU Mingyi, LI Anpeng, et al. High-frequency sequence and microfacies and their impacts on favorable reservoir of Longwangmiao Formation in central Sichuan Basin [J]. *Earth Science*, 2021, 46(10): 3520-3534.
- [43] 赵玉茹, 高达, 胡明毅, 等. 古气候和海平面变化对浅水碳酸盐岩高频层序及有利储层的控制——以川中地区龙王庙组为例[J/OL]. *中国地质*: 1-22[2022-07-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220715.1159.002.html>.
- ZHAO Yuru, GAO Da, HU Mingyi, et al. Controls of paleoclimate and sea-level changes on the high-frequency sequence of shallow-water carbonates: A case study of the Longwangmiao Formation in the central Sichuan Basin [J/OL]. *Geology in China*: 1-22 [2022-07-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220715.1159.002.html>.
- [44] 程丽娟, 李忠, 刘嘉庆, 等. 塔里木盆地巴楚-塔中地区寒武系盐下白云岩储层成岩作用及物性特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 316-327.
- CHENG Lijuan, LI Zhong, LIU Jiaqing, et al. Diagenesis and physical properties of subsalt dolomite reservoirs of the Cambrian, Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 316-327.
- [45] 孔庆芬, 张文正, 李剑锋, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气地球化学特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(3): 423-432.
- KONG Qingfen, ZHANG Wenzheng, LI Jianfeng, et al. Geochemical characteristics and genesis of Ordovician natural gas under gypsolyte in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(3): 423-432.
- [46] 付金华, 于洲, 李程善, 等. 鄂尔多斯盆地东部米探1井奥陶系马四段天然气勘探新发现及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2021, 41(12): 17-27.
- FU Jinhua, YU Zhou, LI Chengshan, et al. New discovery and favorable areas of natural gas exploration in the 4th Member of Ordovician Majiagou Formation by Well Mitan 1 in the eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(12): 17-27.
- [47] 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 41-53.
- ZHOU Jingao, XI Shengli, DENG Hongying, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 41-53.
- [48] 何海清, 郭绪杰, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马四段天然气成藏新认识及勘探重大突破[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(3): 429-439.
- HE Haiqing, GUO Xujie, ZHAO Zhenyu, et al. New understandings on gas accumulation and major exploration breakthroughs in subsalt Ma 4 Member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 429-439.
- [49] 姚泾利, 王程程, 陈娟萍, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组盐下碳酸盐岩烃源岩分布特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(12): 2115-2126.
- YAO Jingli, WANG Chengcheng, CHEN Juanping, et al. Distribution characteristics of subsalt carbonate source rocks in Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(12): 2115-2126.
- [50] 胡安平, 沈安江, 张杰, 等. 碳酸盐岩-膏盐岩高频沉积旋回组合生-储特征——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 943-956.
- HU Anping, SHEN Anjiang, ZHANG Jie, et al. Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: A case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 943-956.
- [51] 罗振锋, 苏中堂, 廖慧鸿, 等. 鄂尔多斯盆地中东部米脂地区奥陶系马五5亚段叠层石白云岩特征及其地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(2): 86-94.
- LUO Zhenfeng, SU Zhongtang, LIAO Huihong, et al. Characteristics and geological significance of stromatolite dolomite of Ma 55 submember of Ordovician Majiagou Formation in Mizhi area, central-eastern Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(2): 86-94.
- [52] 王健, 庞宇晗, 操应长, 等. 塔里木盆地石灰窑露头区寒武系碳酸盐岩断控岩溶储层的形成机制及指示意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(5): 1-12.
- WANG Jian, PANG Yuhua, CAO Yingchang, et al. Formation mechanism and significance of Cambrian carbonate fault-controlled karst reservoir in Shihuiyao outcrop area, Tarim Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(5): 1-12.
- [53] 常媛, 贾鹏飞. 塔里木盆地塔中地区连续型碳酸盐岩油气藏地质特征及形成原因[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(2): 11-15.
- CHANG Yuan, JIA Pengfei. Geological characteristics and forming cause of the continuous carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(2): 11-15.
- [54] 于吉旺, 庞雄奇, 郑定业, 等. 普光地区深层碳酸盐岩气藏主控因素及有利区预测[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(3): 28-35.
- YU Jiawang, PANG Xiongqi, ZHENG Dingye, et al. Main controlling factors and favorable area prediction of deep carbonate gas reservoirs in Puguang Area [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(3): 28-35.

(编辑 张亚雄)