

文章编号: 1000-0550(2011)01-0064-08

鄂尔多斯盆地下奥陶统马家沟组 障壁潟湖沉积相模式及有利储层分布规律^①

周进高^{1,2,3} 张帆² 郭庆新¹ 邓红婴¹ 辛勇光¹

(1. 中国石油杭州地质研究院 杭州 310023; 2. 西南石油大学 成都 610500;

3. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室 杭州 310023)

摘要 依据鄂尔多斯盆地古构造古地理背景、古水动力以及古气候条件,结合单井沉积相分析建立了马家沟组障壁潟湖沉积相模式,该模式分三个阶段即与海侵期相对应的以灰岩沉积为主的障壁潟湖沉积阶段(阶段I)、与海退相对应的以灰岩夹蒸发岩沉积为主的障壁咸化潟湖沉积阶段(阶段II)和与低海平面期对应的以膏岩盐沉积为主的障壁膏盐湖沉积阶段(阶段III)。文章进一步分析并总结了在上述模式下各阶段储层的发育规律,认为阶段I中的障壁滩相和阶段II中的障壁滩及潟湖边缘坪有利于储层的发育,并指出了马家沟组储层主要为岩溶型储层,分布于马一、马三和马五的顶部。

关键词 鄂尔多斯盆地 马家沟组 障壁潟湖 沉积相模式 储层预测

第一作者简介 周进高 男 1967年出生 博士研究生 高级工程师 沉积储层与石油地质 E-mail: Zhoujg8797@sohu.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

鄂尔多斯盆地马家沟组由“三云三灰”六段组成,马一、三、五段为白云岩、膏盐和石盐组成的蒸发岩系,马二、四、六段为灰岩夹白云岩的碳酸盐岩序列,在纵向上构成蒸发岩与碳酸盐岩间互的旋回性沉积^[1,2]。对于马家沟组沉积模式,前人已做了大量研究,主要有冯增昭等提出的潮坪膏盐湖说^[3,4]、吕炳全等的蒸发边缘海说^[5]、刘群等的蒸发台地说^[6]以及侯方浩等提出的蒸发陆架盆地说^[7]等等,上述学说分歧的焦点是对马家沟组蒸发岩的成因认识不同,即到底是水上成因还是水下成因?2000年以来,笔者通过盆地东南缘地表露头及盆内大量钻井岩芯观察发现马家沟组蒸发岩中既有较深水沉积特点也包含浅水成因标志,它实际上是由多个深水—浅水蒸发岩沉积小旋回叠置组成,因此用单一的深水或浅水模式都难以合理解释。考虑到马家沟组碳酸盐岩与蒸发岩间互实际上是由海侵和海退亦即海平面升降和古地理条件共同所控制,笔者从动态演化角度分阶段建立了马家沟组海侵期到海退及至低海平面期持续演化的沉积相模式,即障壁潟湖沉积相模式。随着障壁程度的增加,由宽广的障壁潟湖逐渐向障壁咸化潟湖及至障壁膏盐湖阶段演化。整个马家沟组由上述

模式不同阶段间互沉积构成。

1 马家沟组沉积背景分析

合理的沉积相模式应反映沉积盆地古地理背景、水动力和古气候条件以及它们的演化特点等,因此,在建立鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积相模式之前,有必要对其沉积背景进行分析。

1.1 古构造古地理背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台的西缘,奥陶纪尤其是早奥陶世,由于秦祁贺裂谷的强烈拉张导致沿鄂克托旗—庆阳—韩城一带形成“L”形中央隆起,并在裂谷东北侧形成以米脂—延安为沉降中心的裂谷边侧补偿盆地^[8],同时因离石断裂西盘下降及不均匀沉降的影响,造成边侧盆地东翼较陡西翼和北翼相对平缓的不对称状。在此构造背景下,鄂尔多斯盆地演化成中心凹陷四周隆起的古地理格局,即北面为伊盟古陆和乌审旗隆起,西南为中央隆起,东南为伏牛隆起,东面为离石隆起,中部为米脂凹陷,由凹陷向西部和北部隆起为宽缓的斜坡。值得指出的是,上述隆起在高海平面期主要表现为水下隆起,具有障壁作用,同时因中央隆起与乌审旗隆起和伏牛隆起间均存在构

造鞍部,成为鄂尔多斯盆地与外海沟通的重要通道,详见(图1)。

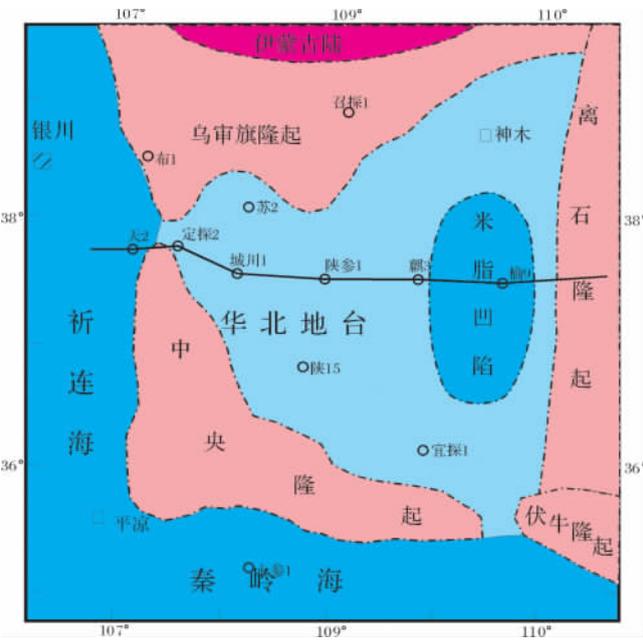


图1 鄂尔多斯盆地奥陶纪古构造简图

Fig.1 Palaeostructure of Ordovician in Ordos basin

1.2 水动力条件

海侵期和海退期的水动力状况完全不同,海侵期(以马四为例),海水覆盖全盆地,从位于边侧盆地凹陷中心的榆9井钻井揭露来看,泥质灰岩沉积物中普遍具水平纹层,推测水体深度较大,但从其中仍夹有具波浪搅动的“疙瘩”状灰岩以及风暴岩推测海水深度应在200 m以内的风暴浪基面之上。此外,由于周围隆起水下门槛作用,导致盆地表层水体循环较好,盆内深处水体循环受限,而水下隆起迎风侧水动力条件较强,可以发育滩体。海退期(以马五为例),在四周隆起的障壁作用下,潟湖与外海的沟通受限,当有海水间歇补给时,潟湖水面与外海海平面相当或略低,水动力条件微弱;而当隆起完全将潟湖与外海隔绝时,由于强烈蒸发,潟湖水面大大低于外海平面,潟湖边缘坪部分暴露,而东部深凹的边侧补偿盆地完全被浓缩的卤水覆盖。

1.3 古气候条件

古地磁资料表明^[9,10],鄂尔多斯盆地早古生代处于赤道附近低纬度,应属于干旱炎热古气候条件。

2 单井相分析

单井相分析是建立相模式的基础,下面着重讨论

鄂尔多斯盆地不同构造部位的重点钻井沉积相序列:

2.1 榆9井相序列

榆9井位于盆地凹陷中心,马家沟组与下伏亮甲山组平行不整合接触。马一段是海水侵入本区后的最早沉积,下部为深灰色含泥粗粉晶白云岩与泥岩不等厚互层,上部岩性为灰色盐岩与中厚层含盐泥、粉晶白云岩不等厚互层,分别代表了潟湖从海侵到海退阶段的完整沉积旋回。

马二段下部为深灰色白云质泥晶灰岩与灰色含白云质泥晶灰岩夹风暴岩;上部为含泥细粉晶白云岩、泥晶白云岩及泥、粉晶灰岩、硬石膏质白云岩夹盐岩、硬石膏岩及泥岩,是本区第二次海侵—海退旋回沉积。

马三段代表了第三个旋回的缓慢海退沉积,由浅棕灰色盐岩、灰色白云质硬石膏岩、膏质白云岩、泥质白云岩及含石膏鲕粒白云岩组成,为咸化潟湖—膏盐湖沉积。

马四段代表了本区第四个海侵也就是最大海侵期的沉积,主要由含颗粒泥晶灰岩、含泥白云质泥晶灰岩、泥质灰岩、泥晶灰岩组成,属宽广的障壁潟湖沉积。

马五段为第四个旋回的海退阶段沉积,由大套盐岩夹含白云质硬石膏岩、粉晶白云岩、灰岩及少量页岩组成,为咸化潟湖—膏盐湖沉积。

马六段(峰峰组)残存厚度各地不一,大多仅5 m左右,为灰色粉晶灰岩,代表第五次海侵期的障壁潟湖沉积。

2.2 城川1井相序列

城川1井位于边侧盆地西翼紧靠中央隆起,马三段直接与中寒武统张夏组不整合接触,马三段代表第三次迅速海侵到达该区后沉积,由深灰色泥晶白云岩、粉晶白云岩、膏质白云岩、云质硬石膏和硬石膏组成,属障壁咸化—膏盐湖沉积序列。

马四段为海侵至最大海泛期沉积,由泥晶灰岩、含颗粒泥晶灰岩夹颗粒灰岩、泥粉晶白云岩、残余颗粒白云岩组成,属弱障壁潟湖沉积。

马五段因后期剥蚀强烈,仅保存下半部分沉积,由泥质白云岩、泥粉晶白云岩、含膏白云岩和灰岩组成,为咸化潟湖边缘坪沉积。

2.3 天2井相序列

天2井位于中央隆起带西部斜坡,桌子山组与下伏寒武系凤山组呈平行不整合接触。桌子山组下部(相当于中东部马四段)由浅灰、褐灰色风暴搅动白

云岩 砾屑白云岩以及滑塌沉积组成 ,为边缘浅滩—斜坡沉积。

桌子山上部(相当于中东部马五段)为一套“疙瘩”状、“砾状”风暴搅动白云岩 ,属台前斜坡沉积。

克里摩里组(相当马六段)由“疙瘩”状、“砾状”灰岩和泥质泥晶灰岩组成夹藻屑灰岩组成 ,水平纹层发育 ,属斜坡—盆地沉积。

上奥陶统乌拉力克组由泥云质灰岩和云泥质灰岩组成 ,向西至卢参 1 井为钙屑浊积岩 ,黑色页岩夹泥晶灰岩及硅质页岩组成 ,属盆地相。

上奥陶统拉什仲组由深灰色泥岩、钙质泥岩和泥灰岩组成 ,水平纹层发育 ,向西至卢参 1 井为钙屑浊积岩 ,黑色页岩夹泥晶灰岩及硅质页岩组成 ,属盆地相。

通过以上单井相分析 ,笔者建立了马家沟组沉积相空间演化序列。从图 2 可以看出 ,马一至马二时 ,海水主要由东部和东南方向侵入本区 ,覆盖了边侧盆地凹陷中心范围 ,构成了两个从海侵到海退的完整旋回;马三早期 ,海水大规模入侵 ,迅速覆盖边侧盆地的西部和北部边缘 ,由于快速海侵 ,保存的主要是海退时期的沉积;马四为最大海泛时期 ,海水由东、南和西三个方向侵入 ,迅速淹没了整个中央隆起 ,华北海和祁连、秦岭海槽全面贯通形成统一盆地 ,此时中央隆起成为水下障壁并以此为基础逐渐发育成滩坪 ,其外侧为斜坡—盆地 ,内侧为宽广的潟湖 ,整个马四期由海侵至高海平面沉积组成;马五因海平面大幅下降及中央隆起的障壁作用 ,盆地逐渐与外海隔绝 ,记录了从咸化潟湖至膏盐湖演化过程;马六为本区又一次大海侵时期 ,从残存的主要为灰岩来看 ,应属宽广潟湖

沉积。

3 沉积相模式

迄今为止 ,已有的碳酸盐岩沉积模式如缓坡模式^[11]、陆架模式^[11,12]、陆表海模式^[13]和蒸发岩沉积相模式^[14-16]都是静态描述模式 ,这些模式对海平面相对稳定的某一段时间内相的描述和解释无疑是可行的 ,但对海平面升降频繁或对一个完整的海侵至海退旋回来说却难以准确反映相序的演化。本区马家沟组纵向上“云灰”间互的特点表明其由多个海侵至海退旋回组成 ,为了能动态地反映马家沟组的相序演变 ,笔者将一个完整的海平面升降旋回分为海侵期、海退期和低海平面期三个时段 ,它们分别与灰岩、白云岩夹膏盐岩和膏盐石盐沉积期相对应 ,从而建立了马家沟组障壁潟湖沉积模式 ,图 3—图 5 分别代表了该模式的三个阶段:即障壁潟湖、咸化潟湖和膏盐湖沉积阶段。

3.1 障壁潟湖沉积阶段(阶段 I)

代表海侵至最大海泛沉积阶段 ,与侯方浩等之陆棚模式 A 期相当^[17]。海侵期海水由构造鞍部及东部低隆三个方向进入本区 ,因与外海沟通 ,海水补给大于或等于蒸发 ,海平面持续上升 ,此时以灰岩沉积为主间夹少量白云岩和泥岩 ,如马一、马二和马四的下部灰岩段;海侵晚期至最大海泛时(如马四、六) ,由于中央隆起被海水淹没 ,鄂尔多斯盆地与外海水体循环更为通畅 ,主要沉积泥晶灰岩和各种颗粒灰岩。该阶段与威尔逊经典的陆表海沉积相模式相似 ,但本文更强调该阶段水下隆起的障壁对后缘潟湖沉积所起的控制作用 ,以马四期为例 ,其沉积环境主要包括潮

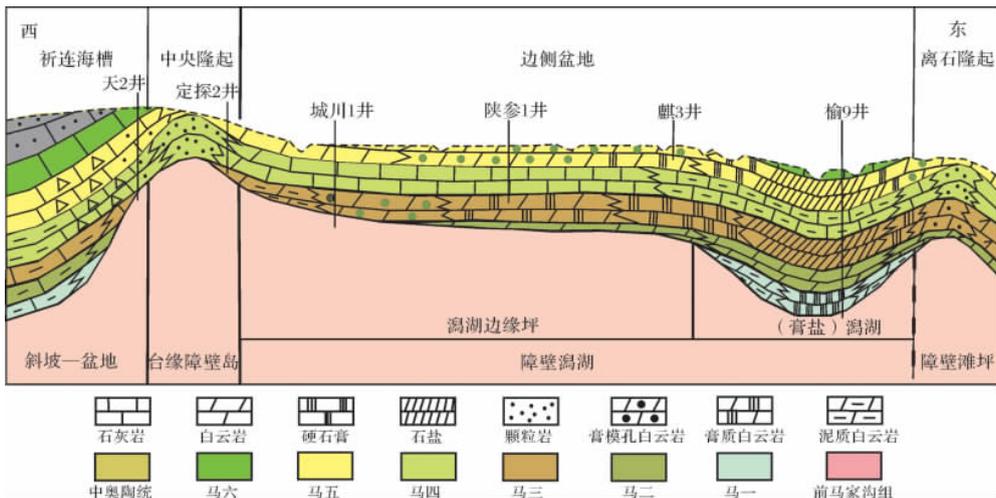


图 2 鄂尔多斯盆地马家沟组沉积相对比图

Fig. 2 Sedimentary facies section of Majiagou Formation in Ordos basin

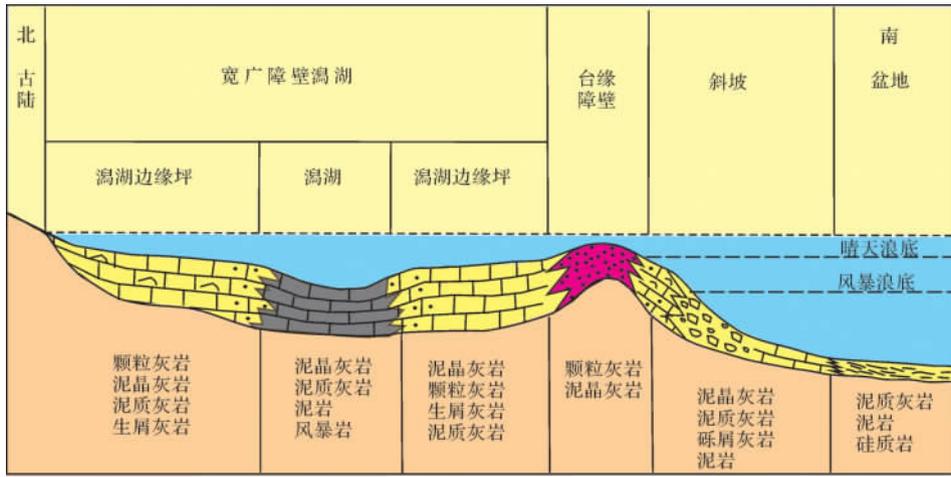


图 3 马家沟组障壁潟湖沉积相模式(阶段 I)

Fig. 3 Barrier-lagoon sedimentary model of Majiagou Formation (Phase I)

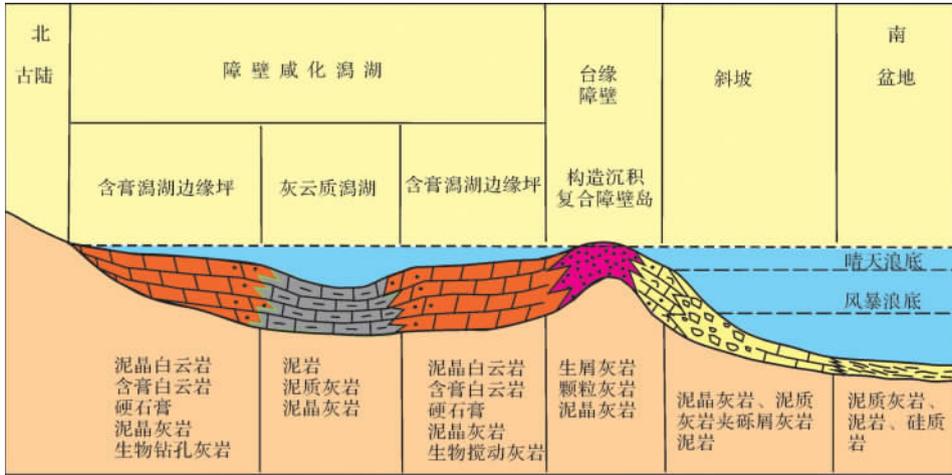


图 4 马家沟组障壁潟湖沉积相模式(阶段 II)

Fig. 4 Barrier-lagoon sedimentary model of Majiagou Formation (Phase II)

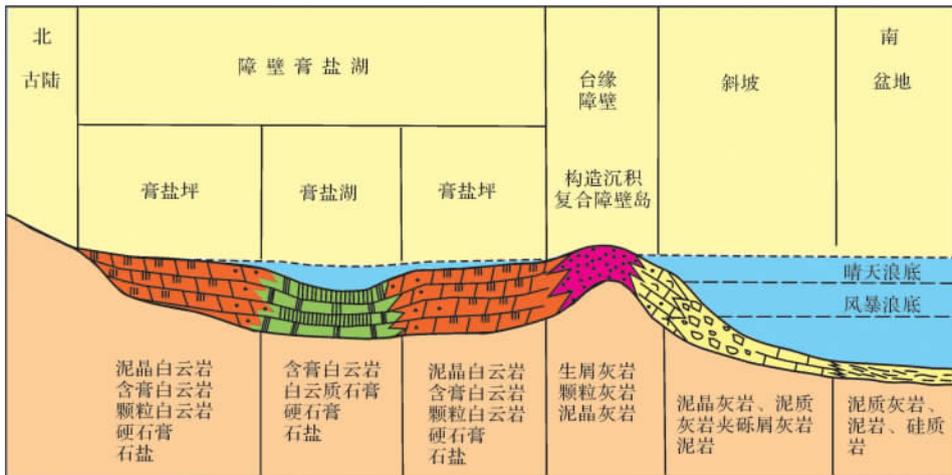


图 5 马家沟组障壁潟湖沉积相模式(阶段 III)

Fig. 5 Barrier-Lagoon sedimentary model of Majiagou Formation (Phase III)

坪、潟湖、潟湖边缘坪、台缘障壁滩、斜坡等。包洪平等^[18]将上述环境沉积归为与开阔海有关的微相(图 3)。

潮坪: 主要环伊盟古陆南缘和庆阳古陆周缘分布,由于后期剥蚀强烈,伊盟古陆南缘潮坪沉积可能已被剥蚀,目前仅在庆深 2 井揭示潮坪沉积为一套泥质泥粉晶白云岩。

潟湖: 位于边侧盆地东部凹陷中心部位,由于水体较深且循环不畅,主要沉积泥质灰岩、泥晶灰岩及风暴岩。

潟湖边缘坪: 位于中央水下隆起后侧环潟湖分布的宽广浅水区。由于障壁较弱,水体与外海交替良好,含盐度比较正常,主要沉积生屑泥晶灰岩、生屑灰岩和颗粒灰岩。

台缘障壁滩: 位于中央隆起带上,以颗粒灰岩、生物搅动灰岩和生物钻孔灰岩沉积为主,常因白云石化作用变成残余颗粒白云岩和斑状白云岩。

台前斜坡: 位于中央隆起带的西侧和南侧,与秦祁海槽相连,主要发育条带状泥质灰岩,水下滑塌砾屑灰岩等。

3.2 障壁咸化潟湖沉积阶段(阶段 II)

代表海退沉积阶段,与侯方浩等之陆棚模式 B 期相当。海退期因海平面下降(马一、马三、马五),中央隆起包括东面的离石隆起对海水的障壁增强,此时的障壁岛位于海平面附近,仅构造鞍部与外海沟通,由于强烈蒸发作用,宽广的潟湖逐渐演化为咸化潟湖环境,潟湖水体含盐度增大,灰泥沉积下来后迅速转化成白云石,在潟湖边缘坪,硬石膏可直接从表层水晶出而沉淀下来,而在凹陷的中心因有通道间歇与外海沟通,海水盐度相对正常,以灰泥沉积为主间夹白云岩;咸化潟湖主要包含潟湖边缘坪、浅滩和灰(云)质潟湖环境(图 4)。

潟湖边缘坪: 沿古陆和隆起内侧分布,水体相对较浅,以白云岩和含硬石膏白云岩沉积为主,淡化时夹少量灰岩。

浅滩: 散布在边缘坪中,有鲕粒滩、砂屑滩和风暴滩等,由鲕粒白云岩、砂屑白云岩、竹叶状砾屑白云岩以及粉屑白云岩等组成。

灰(云)质潟湖: 位于潟湖凹陷的中心部位,局部仍存在与外海相连的通道但受限严重,由于水体较深加之循环不畅,主要沉积泥岩、泥质灰岩或泥晶白云岩。

3.3 障壁膏盐湖沉积阶段(阶段 III)

当海平面继续下降至低海平面时,隆起完全露出水面,鄂尔多斯盆地则演化为与外海隔绝的海盆,在强烈的蒸发作用下变成极度咸化的膏盐湖,沉淀出硬石膏和石盐。马三和马五就是由多个咸化潟湖至膏盐湖沉积旋回组成。膏盐湖主要有膏盐坪和膏盐石盐潟湖(包括深水和浅水)环境。

膏盐坪: 这是潟湖水位极度下降时,边侧盆地边缘大部暴露形成,主要有白云岩、硬石膏和盐壳层沉积,而盐壳层又往往因再次淡化溶解难以保存。

膏盐石盐潟湖: 潟湖水位极度下降时仅边侧盆地凹陷中心有残余卤水覆盖,此时水体含盐度很高,主要沉积硬石膏和石盐,偶有含钾石盐和钾盐薄层沉积。

4 有利储层分布规律

储层的形成与沉积和成岩作用密切相关,据研究,马家沟组主要发育两类储层,即与岩溶作用有关的含膏模孔白云岩储层^[19~24]和与白云化作用有关的结晶白云岩储层^[25]。两者均受沉积相带和成岩作用的共同控制,但相控是关键^[26]。因此,利用沉积模式可以分析和预测储层的宏观展布规律,这也是建立马家沟组障壁潟湖沉积模式的重要现实意义。

4.1 岩溶型白云岩储层的分布规律

研究表明,岩溶型白云岩储层的主要岩性是(含)硬石膏溶模孔和/或晶模孔细粉晶白云岩,该岩石类型主要形成于模式的阶段 II 即咸化潟湖边缘坪环境。从钻探结果看,这套储层分布在马一、马三和马五。以马五为例,由于海平面升降频繁,该储层纵向上多次发育,如马五 1、马五 2 和马五 4 小层均有发育;在平面上,其发育受(含)硬石膏结核和/或细柱状晶的细粉晶白云岩潟湖边缘坪控制,环潟湖分布。此外,从阶段 II 演化可预知,咸化潟湖的障壁岛和潟湖边缘坪经常暴露地表,易于遭受淡水溶蚀作用而产生孔隙,尤其是马五顶部又叠加了加里东期漫长的地表风化作用,对早期形成的孔洞进行广泛改造,进一步改善储集性能。长庆气田的主要产层均由这套储层组成。综上所述,该类储层的发育主要受控沉积微相,但储层的优劣还与岩溶作用和岩溶古地貌有关,大量的研究显示上述有利岩相与岩溶斜坡或岩溶残丘叠置的部位才是优质储层的分布区。

4.2 结晶白云岩储层的分布规律

该储层常见两种岩石类型:斑状粉晶白云岩和细中晶白云岩。斑状白云岩储层主要见于阶段 I 的中

央隆起带缓坡和边侧盆地潟湖边缘坪与潟湖转折部位,如中央隆起带上的盟 6 井等,潟湖边缘坪上的陕 16、榆 25、双 4 井等。纵向上见于马四和马五₅₁地层中,从斑状白云岩中生物搅动斑和生物潜穴向上增多且生物潜穴主要为水平状分析,斑状白云岩属向上变浅沉积序列,初步恢复其原岩主要为颗粒灰岩和生物钻孔或搅动灰岩。斑状白云岩的斑由颜色和晶粒的差异显示出来,斑内白云石晶体相对较粗,粗粉晶结构,晶间孔、晶间扩溶孔和溶孔较发育,而斑外则由细粉晶白云石组成,孔隙不发育;总的来说,斑状白云岩储集空间主要有白云石晶间孔、晶间扩溶孔和溶孔溶洞,此外还有少量的溶缝、微裂缝和缝合线;储集空间中充填物较少,仅在孔径较大的溶孔溶洞中见有少量渗流白云石粉砂,偶见硬石膏、石英和方解石等自生充填矿物。从岩芯来看,白云石晶间孔、晶间扩溶孔主要发育于生物搅动斑和生物潜穴内,而较大的溶孔溶洞则集中分布在斑状白云岩的某一层段,使得在纵向上具有溶孔溶洞的斑状白云岩、斑状白云岩和粉晶白云岩逐渐过渡的特点并发育多个组合。

细中晶白云岩见于阶段 I 的中央隆起带障壁滩和边侧盆地潟湖边缘坪中颗粒滩,如中央隆起带的定探 1 井、定探 2 井等。该储层通常为不等晶白云岩,白云石晶粒较粗,以细—中晶为主,部分达粗晶,有的尚保留颗粒结构,有的仅见生屑幻影,说明这套储层是由颗粒灰岩经白云化作用形成。张永生等^[25]认为其属深埋白云化的结果。

总之,马家沟组储层具有以下分布规律:在障壁潟湖模式阶段 I,台缘障壁滩、潟湖边缘颗粒滩生物钻孔和搅动灰泥坪是利相带,经白云化作用改造后能形成结晶白云岩型储层;在阶段 II,障壁滩及潟湖边缘坪是利相带,经准同生期岩溶以及后期表生岩溶作用的改造可形成岩溶型白云岩储层。尽管目前的勘探基本集中在马五,也取得了长庆气田这样丰硕成果,笔者认为马一和马三顶部储层具有一定潜力,位于中央隆起上的定探 1 井揭示,马三顶部岩溶型白云岩储层厚达 200 余米,镜下观察面孔率达 4%~6%,其储集性能可与盆地东部马五储层媲美,而且其可与马四底部致密灰岩层构成岩性地层圈闭,显示具有较大勘探潜力。阶段 III,主要以硬石膏和石盐沉积为主,难以形成规模储层,而是本区重要的封堵层。

参考文献 (References)

1 陕西地质矿产局. 陕西地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1989 [Bu-

- reau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi. Regional Geology of Shaanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989]
- 2 杨俊杰, 李克勤, 张东生, 等. 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 [Yang Junjie, Li Keqin, Zhang Dongsheng, et al. Petroleum Geology of China (Vol. 12) Changqing Oil Field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992]
 - 3 冯增昭, 陈继新, 张吉森. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理 [M]. 北京: 地质出版社, 1991 [Feng Zengzhao, Chen Jixin, Zhang Jisen. Early-paleozoic Lithofacies Paleogeography of Ordos Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991]
 - 4 冯增昭, 鲍志东, 等. 鄂尔多斯奥陶纪地层岩石岩相古地理 [M]. 北京: 地质出版社, 1998 [Feng Zengzhao, Bao Zhidong, et al. Stratigraphy, Petrology and Lithofacies Paleogeography of Ordovician in Ordos [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998]
 - 5 吕炳全, 李银德, 黄月明, 等. 蒸发边缘海相储层的研究 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 1-18 [Lü Bingquan, Li Yinde, Huang Yue-ming, et al. Study on Reservoirs of Evaporation Marginal Sea [M]. Shanghai: Press of Tongji University, 1995: 1-18]
 - 6 刘群, 杜之岳, 陈郁华, 等. 陕北奥陶系和塔里木石炭系钾盐找矿远景 [M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 1-113 [Liu Qun, Du Zhiyue, Chen Yuhua, et al. Potash Salt-searching Prospects in Northern Shanxi Ordovician and Tarim Carboniferous [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997. 1-113]
 - 7 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, 2002, 7(1): 38-46 [Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Zhao Jingsong, et al. Sedimentary mode of Middle-Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2002, 7(1): 38-46]
 - 8 张军, 徐黎明, 包国平. 陕甘宁盆地中央古隆起的形成及其与天然气的关系 [C]//长庆油田研究院编. 鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集(1990-2000). 北京: 石油工业出版社, 2000: 58-63 [Zhang Jun, Xu Liming, Bao Guoping. The Forming of Central Uplift of Shan-Gan-Ning Basin and Its relationship with Gas [C]//Changqing Institute of Petroleum Exploration and Development, Papers of Petroleum Exploration and Development in Ordos Basin (1990-2000). Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 58-63]
 - 9 刘育燕, 杨巍然, 森永速男, 等. 华北、秦岭及扬子陆块的若干古地磁研究结果 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1993, 18(5): 635-641 [Liu Yuyan, Yang Weiran, Senyongshunan, et al. Some paleomagnetic results on North China, Qingling and Yangtze Blocks [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1993, 18(5): 635-641]
 - 10 吴汉宁, 常承法, 刘椿, 等. 依据古地磁资料探讨华北和华南块体运动及其对秦岭造山带构造演化的影响 [J]. 地质科学, 1990, (3): 201-214 [Wu Hanning, Chang Chengfa, Liu Chun, et al. Evolution of the Qingling Fold Belt and the movement of the North and South China blocks—the evidence of geology and paleomagnetism [J]. Scientific Geologica Sinica, 1990, (3): 201-214]
 - 11 Read J F. Carbonate platform facies models [J]. AAPG Bulletin, 1985, 69: 1-21
 - 12 Wilson J L. Carbonate Facies in Geologic History [M]. New York :

- Springer-Verlag, 1975: 471
- 13 Irwin M L. General theory of epeiric clear water sedimentation [J]. *AAPG Bulletin*, 1965, 49: 445-459
 - 14 Scruton P C. Deposition of evaporates [J]. *AAPG Bulletin*, 1953, 37: 2498-2512
 - 15 Hsü K J. Origin of saline giants: a critical review after discovery of the mediterranean evaporite [J]. *Earth Science Review*, 1972, 8: 371-396
 - 16 Poryt T M. Sedimentology and paleoecology of the zechstein limestone (upper Permian) in the Fore-Sudetic area (western Poland) [J]. *Sedimentary Geology*, 1978, 20: 217-243
 - 17 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征 [J]. *沉积学报* 2003, 21(1): 106-112 [Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Dong Zhaoxiong, *et al.*. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2003, 21(1): 106-112]
 - 18 包洪平, 杨承运. 鄂尔多斯东部奥陶系马家沟组微相分析 [J]. *古地理学报*, 2000, 2(1): 31-42 [Bao Hongping, Yang Chengyun. Study on microfacies of Majiagou Formation, Lower Ordovician, Eastern Ordos, North China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(1): 31-42]
 - 19 黄月明, 杨奕华, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中部马家沟组天然气储层特征 [J]. *石油与天然气地质*, 1992, 13(4): 390-397 [Huang Yueming, Yang Yihua, Bao Hongping, *et al.*. Reservoir characteristics of Majiagou Formation in central Ordos Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 1992, 13(4): 390-397]
 - 20 张锦泉, 郑承光, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组古岩溶天然气储层 [J]. *成都地质学院学报*, 1992, 19(4): 65-70 [Zhang Jingquan, Zheng Chengguang, Chen Hongde, *et al.*. Paleokarst gas-reservoir of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of Chengdu Geological College*, 1992, 19(4): 65-70]
 - 21 吴熙纯, 金香福. 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 [Wu Xichun, Jing Xiangfu. Control of Ordovician paleokarst zones in South Ordos on gas reservoir [J]. *Oil and Gas Geology*, 1997, 18(4): 294-299]
 - 22 彭军, 田景春, 侯中健, 等. 陕甘宁盆地中部气田马五₄段白云岩储层孔隙充填物与储集性 [J]. *中国海上油气: 地质*, 1999, 13(2): 97-102 [Peng Jun, Tian Jingchun, Hou Zhongjian, *et al.*. The Vugs-filling material and reservoir quality of dolostone of Majiagou Formation in Central Gas Field of Shan-Gan-NiIng Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 1999, 13(2): 97-102]
 - 23 彭军, 田景春, 覃建雄, 等. 岩溶作用对鄂尔多斯盆地中部气田马五段储集层的控制作用 [J]. *复式油气田* 2000, 1(1): 13-16 [Peng Jun, Tian Jingchun, Qin Jianxiong, *et al.*. Control of karstification to the reservoir of the 5th Member of Majiagou Formation in gas field of Central Ordos Basin [J]. *Multiple Oil-Gas Field*, 2000, 1(1): 13-16]
 - 24 马振芳, 付锁堂, 陈安宁, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古风化壳气藏分布规律 [J]. *海相油气地质*, 2000, 5(1-2): 98-102 [Ma Zhenfang, Fu Suotang, Chen Anning, *et al.*. Distribution regularities of Ordovician weathering-crust gas reservoir in Ordos Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2000, 5(1-2): 98-102]
 - 25 张永生. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群中部块状白云岩的深埋藏白云石化机制 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 424-430 [Zhang Yongsheng. Mechanism of deep burial dolomitization of massive dolostone in Middle Majiagou Formation of Ordovician, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 424-430]
 - 26 周进高, 邓红婴, 郑兴平. 鄂尔多斯盆地马家沟组储集层特征及其预测方法 [J]. *石油勘探与开发* 2003, 30(6): 72-74 [Zhou Jingao, Deng Hongying, Zheng Xingping. Reservoir types and prediction of Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2003, 30(6): 72-74]

Barrier-Lagoon Sedimentary Model and Reservoir Distribution Regularity of Lower-Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin

ZHOU Jin-gao^{1, 2, 3} ZHANG Fan² GUO Qing-xin¹ DENG Hong-ying¹ XING Yong-guang¹

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023;

2. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500;

3. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC, Hangzhou 310023)

Abstract Lower Ordovician Majiagou Formation is composed of six members in which Ma1, Ma3 and Ma5 are evaporate including dolomite, anhydrite and salt and Ma2, Ma4, Ma6 are limestone with dolomite in Ordos Basin. Majiagou Formation is formed by cyclic sedimentation by intermeshed evaporite and carbonate. Upwarps around the basin and a downwarp in the centre of the basin constitute the Early-Ordovician Palaeogeomorphologic pattern. Upwarps as underwater barriers led to exchange limitation between lagoon and exterior sea and weakness of lagoon hydrodynamic force during high sea level stage. During low sea level stage, upwarps resulted in the entire isolation between lagoon and exterior sea. Owing to the strong evaporation, lagoon level was greatly lower than exterior sea level. So lagoon margin flat was partly exposed to atmosphere and the deep sag in the centre of the basin was covered by concentrated

bittern.

Analysis of single well and well tie sedimentary facies demonstrates the depositional setting from Ma1 and Ma2 member is composed of two integrating cycles from transgression to regression due to sea water invasion from the east and southeast of the basin. Ma3 member is mainly composed of regressive deposition owing to the rapid extensive transgression in the early Ma3 stage. North China sea, Qilian oceanic trough and Qinling oceanic trough formed a united basin and the centre uplift zone was developed to a platform margin, the west of the centre uplift zone was developed to a basin and a slope and the east of the centre uplift zone was developed to a broad lagoon during the biggest sea water invasion in Ma4 stage. Ordos Basin was isolated from exterior sea and the salty lagoon was changed to a salt lake gradually during Ma5 stage owing to sea level descend and barrier of the centre uplift zone. In Ma6 stage the Basin was changed to a broad lagoon.

Based on the pioneer research of paleo-structure, paleo-geography, paleo-hydrodynamic as well as paleo-climate, a new model-barrier-lagoon sedimentary model of Majiagou Formation is developed. The model includes three phases during transgression to high sea level (phase I), carbonate deposits in broad barrier-lagoon, and mixed carbonate / evaporate succession in concentrated lagoon during regression (phase II), and anhydrite and salt in saline during low sea level (phase III).

And two main types of carbonate reservoir including the dolomite reservoir in relation to karstification and the crystallization dolomite reservoir in connection with dolomitization are discovered in this paper. The authors further analyze the carbonate reservoir distribution law within the mentioned model, conclude that beach-flat of platform edge of the model (phase I) and lagoon margin flat of phase II are favorable for reservoir growth and point out that the reservoir of Majiagou Formation is karst type and is mainly distributed on the top of Ma5, Ma3 and Ma1 Formation. Anhydrite and salt of phase III are important seal rock.

Key words Ordos Basin; Majiagou Formation; barrier lagoon; sedimentary model; reservoir prediction

勘 误

本刊 2010 年 28 卷 6 期《通南巴地区飞仙关组三段储层成因机制探讨》一文的第二作者“李英”应为“李爽”，英文名为“LI Shuang”，特此更正，并向作者致歉。

《沉积学报》编辑部