

文章编号: 1000-0550(2010)06-1153-12

靖边气田马五₁₋₄亚段沉积微相和成岩作用研究^①

雷卞军¹ 卢涛² 王东旭² 王勇² 李世临¹ 顾绍富¹

(1. 西南石油大学 成都 610050; 2. 长庆油田分公司勘探开发研究院 西安 710021)

摘 要 鄂尔多斯盆地靖边气田马五₁₋₄亚段属于陆表海蒸发碳酸盐潮坪相。潮上带(含)石膏结核白云岩和潮间带上部的含石膏晶模白云岩最有利于形成储层。马五₁₋₄亚段碳酸盐岩经历了复杂的成岩作用,准同生期白云石化和膏化作用奠定了储层的物质基础;表生岩溶期选择性溶解作用构筑了储层的轮廓;埋藏期溶解作用和各种矿物充填作用,决定早期溶孔能否保存和储层最终状况。引入“负胶结物孔隙度”概念,更直观地反映了沉积作用对马五₁₋₄亚段储层发育的控制作用。将沉积微相和成岩相研究有机地结合在一起,以简约的方式,用一套数字组合符号半定量地表达沉积微相和成岩相,在开发区块储层评价和预测上获得了良好效果。

关键词 靖边气田 马五₁₋₄亚段 沉积微相 成岩作用

第一作者简介 雷卞军 男 1955 年出生 教授 沉积学与储层地质 E-mail: ediword@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

20 世纪 90 年代以来,围绕着鄂尔多斯盆地中部靖边气田的勘探与开发,已有许多研究者作过碳酸盐岩沉积相和成岩作用方面研究^[1-6]。目前,靖边气田马家沟组马五₁₋₄亚段储层的沉积、成岩概况已经明了。靖边气田现正在向东和向南进行扩边勘探和开发。沉积微相和成岩作用研究依然是区块气藏储层精细描述的重要基础工作。以往有关沉积微相和成岩作用研究基本上是以定性的和描述性的为主,这样难以满足储层精细描述的需要。在近几年靖边气田扩边区马五₁₋₄亚段储层综合评价中,我们将沉积微相和成岩作用两者研究紧密结合,在原有的工作基础上采用了半定量或定量方法,总结归纳出一套崭新的沉积微相和成岩相的表征方法,并将它们用于编制区块小层沉积微相平面图和成岩作用分区图,在开发区块储层评价和预测方面取得了良好效果。

1 地层和储层概况

鄂尔多斯盆地中部下奥陶统马家沟组属陆表海碳酸盐岩和蒸发岩沉积,其自下而上分为马一段至马六段,其中马一、马三、马五段岩性为泥晶—细粉细白云岩、膏岩和盐岩;马二、马四、马六段岩性以泥状灰岩或粒泥状灰岩为主。中奥陶世末加里东运动使华北地台抬升为陆地,盆地内马家沟组顶部地层经历了

长达 1.3 亿多年的风化剥蚀,缺失了 D、S 和 C₁ 地层,至中石炭世华北地台又整体下降,接受中、上石炭统海陆交互的含煤碎屑岩沉积。马五段顶部由古岩溶作用产生了层位较稳定的溶蚀孔洞白云岩储层。

根据马五段沉积旋回、岩性组合特点,将马五段从下至上划分为:马五₁₀、马五₉至马五₁等十个亚段。马五段产气层分布于古风化壳的顶部马五₁₋₄亚段。马五₁₋₄亚段地层岩性为白云岩、泥质白云岩、少量膏质云岩及凝灰质泥岩。一般厚度 80~110 m。靖边气田处在鄂尔多斯盆地中伊陕单斜单元上。古岩溶储层发育状况明显受沉积微相、岩溶地貌、成岩作用及小幅度构造等因素控制和影响,通常,马五₁₋₄亚段仅发育几层累计厚度为 2~10 m 的有效储层。长庆油田勘探开发研究院对于与产气层密切相关的马五₁₋₄亚段地层已有成熟的详细划分方案(表 1)。

马五₁₋₄储集岩主要为风化壳型溶蚀孔洞白云岩;另有少数粗粉晶—细晶白云岩、鸟眼孔白云岩及溶塌角砾岩;其它储集岩类型则极少见。溶蚀孔洞白云岩储层的原岩为含膏泥—细粉晶白云岩。表生风化壳岩溶期,含膏白云岩中的(硬)石膏结核和晶体被大气淡水溶解成孔洞,然后被一种或几种矿物部分充填后的残余空间构成储集体。粗粉晶—细晶白云岩储集空间主要为以晶间孔,其仅见于靖边气田局部地区某些小层中,譬如,陕 200 井区马五₁小层中见较多储集性能很好的晶粒白云岩。晶粒白云岩虽然

^①四川省重点学科建设项目(SZD0414)资助

收稿日期:2009-07-09;收修改稿日期:2009-11-04

数量很有限,但其孔、渗性都很好。其它类型的碳酸盐岩储层对气藏的贡献则相当小。

表1 靖边气田马五₁₋₄亚段小层划分
Table 1 Sublayer of Ma5₁₋₄ submember of Jingbian Gas Field

亚段	小层	岩性简述	气层
马五 ₁	马五 ₁ ¹	灰、浅灰色泥晶—细粉晶白云岩、具溶孔泥晶—	1
	马五 ₁ ²	细粉晶白云岩,夹少量深灰色泥质云岩和云质	2
	马五 ₁ ³	泥岩。构成4~5个米级旋回。顶部为风化壳	3
	马五 ₁ ⁴	剥蚀面。残留地层厚8~17 m。	4
马五 ₂	马五 ₂ ¹	上部灰、浅灰色白云岩和泥质云岩,下部浅灰色	5
	马五 ₂ ²	泥晶—细粉晶白云岩。地层厚度5~10 m。	6
马五 ₃	马五 ₃ ¹	深灰色泥质白云岩、云质泥岩,夹少量浅灰色泥	7
	马五 ₃ ²	晶—细粉晶白云岩。常发育岩溶角砾岩,有时	
	马五 ₃ ³	夹少量白色硬石膏。地层厚度17~30 m。	8
马五 ₄	马五 ₄ ^{1a}	顶部(2~4 m)为浅灰色具溶孔白云岩,有些溶	9
	马五 ₄ ^{1b}	孔中含较多残留硬石膏。主体为深灰色细粉晶	
	马五 ₄ ²	白云岩和泥质云岩,有时夹膏质白云岩和硬石	10
	马五 ₄ ³	膏岩。地层厚度40~50 m。	

2 沉积概貌和沉积微相

2.1 沉积概貌

早奥陶世马家沟期,由于鄂尔多斯盆地内陆架浅海周期性处于与外海较好连通、受阻隔和封闭状态,造成浅海相碳酸盐岩和内陆架盐湖相蒸发岩在地层垂向上交互叠置。马五段沉积期,一方面内陆架海域是较局限的甚至有时封闭,沉积以富镁碳酸盐岩和蒸发岩为特征;另一方面鄂尔多斯盆地板块与邻区板块挤压作用相对减弱致使内陆架下降作用减缓^[7]。马五₁₀至马五₅亚段沉积期,内陆架海沉积的蒸发岩和碳酸盐岩填平作用显著,至马五₁₋₄亚段沉积期,沉积格局已由内陆架蒸发泻湖和环湖潮坪,逐渐演变成地势较均一的陆表海台地潮坪环境。该环境具有沉积水体较浅,分布范围广,波浪和潮汐流作用较弱,蒸发作用较强等特征。

(1) 鄂尔多斯盆地范围马五₁₋₄亚段的沉积环境为陆表海台地蒸发潮坪,潮坪范围非常广阔,甚至超过了鄂尔多斯盆地范围,乃至整个华北地区。靖边气田由西向东,沉积环境由潮上带、潮间带向潮下带逐渐过渡,地面坡度很小($<1^\circ$)。靖边气田中部和西部马五₁₋₄亚段以潮坪准同生白云岩为主,颗粒碳酸盐岩极少见;而气田东部地区(统5井区东部,榆31

井区东部、陕200井区东部)马五₁⁴、马五₂¹、马五₂²小层可见少量颗粒碳酸盐岩,表明气田东侧沉积水体逐渐变深、水域亦相对变开阔。

(2) 蒸发潮坪高分辨率层序地层成因与周期性气候变化密切相关。马五₁₋₄亚段可分为5个中期基准面沉积旋回和26~28个短期基准面沉积旋回^[8]。局限海域蒸发条件下的碳酸盐沉积物的高生成率,使得含膏碳酸盐沉积物的堆积速度总是大大超过它们所在的台地的沉降速度。在大范围内形成一系列向上变浅的碳酸盐潮坪基本层序。每个米级基本层序沉积过程是:海平面上升较突然,水体迅速加深并且带来较多泥质沉积,而后较纯的碳酸盐(或含膏)快速堆积使沉积水体逐渐变浅,直至沉积界面接近海面和暴露。

(3) 沉积相柱状对比图表明:地层和岩相有较好的对比性,即同期岩相横向上变化很小;较大范围内岩相垂向上变化具同步性。从马五₄至马五₁,沉积水体逐渐变浅,即潮下带亚相沉积逐渐减少,潮间和潮上带亚相逐渐增多。马五₁₋₄亚沉积微相在垂向上分布受高分辨率层序地层的控制;在横向上则受沉积微古地貌的控制。

2.2 亚相和微相特征

靖边气田马五₁₋₄亚段陆表海台地蒸发碳酸盐潮坪相可分为潮上带、潮间带和潮下带3种亚相及18个微相(表2)。研究对象与近代类似环境的对比研究是微相划分的主要依据之一。譬如,阿拉伯湾全新世海岸萨布哈垂向层序和地中海海岸萨布哈垂向层序均表明:蒸发潮坪潮上带沉淀作用发生在潮坪潜水面以上的毛细管力作用带,该带中成化的海水进一步浓缩成卤水,析出(硬)石膏结核和大晶体;而潮间带上部白云岩可含少量石膏晶体^[9]。

潮上带膏质云坪微相:岩性是(含)石膏结核泥晶—细粉晶白云岩,石膏结核近似圆状,直径0.5~5 mm,多数直径1~3 mm。含量一般5%~30%。如今古风化壳近表层的白云岩中石膏结核已全部变成了溶斑。表生岩溶期石膏结核被溶成为孔洞,并且在表生期被渗流粉砂白云石、之后成岩期被亮晶方解石、流粉砂白云石、亮晶方解石、亮晶白云石和高岭石等矿物半—全充填。白云岩中石膏结核的数量与当时海水蒸发量和补给速度有关。

潮间带沉积微相:主要由泥晶—细粉晶白云岩组成,可含少量石膏晶模,可见藻纹层、粉屑和球粒。偶见水平纹层,由于生物扰动影响纹层常被破坏。

表 2 研究区马五₁₋₄亚段沉积微相划分
Table 2 Sedimentary microfacies of Ma5₁₋₄ submember in Jingbian Gas Field

相	亚相	微相岩性
蒸发潮坪	潮上带 潮上(含)膏质云坪	①膏质(结核)泥晶—细粉晶白云岩 ②含膏质(结核)泥晶—细粉晶白云岩
	潮间上部	①含石膏晶模泥—细粉晶白云岩 ②藻纹层泥—细粉晶白云岩 ③具鸟眼泥—细粉晶白云岩 ④块状泥—细粉晶白云岩。
	潮间下部	⑤球粒白云岩 ⑥粉屑白云岩 ⑦隐藻屑泥—细粉晶白云岩
	潮下带	①纹层泥—细粉晶白云岩 ②(含)泥质泥晶白云岩 ③纹层云质泥岩 ④凝灰质泥岩 ⑤豹斑状云质灰岩 ⑥晶粒白云岩(次生) 高能潮下带⑦砂屑白云岩 ⑧鲕粒白云岩 ⑨砾屑白云岩

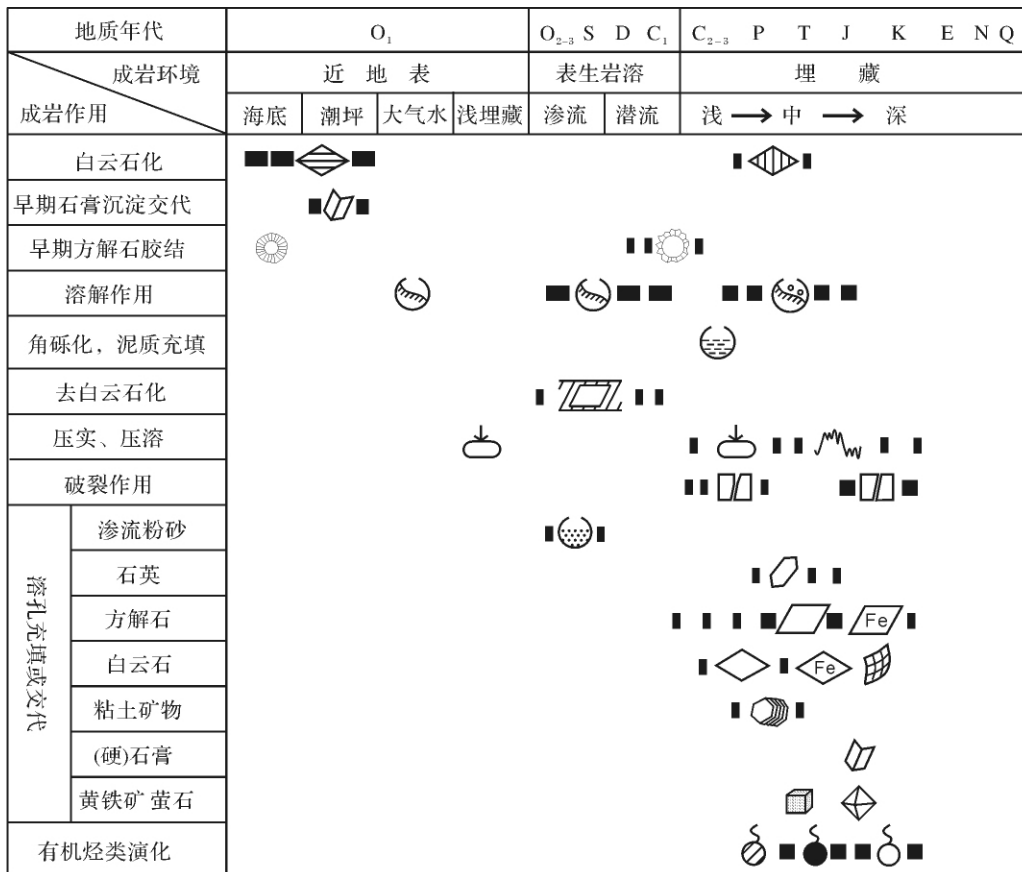


图 1 靖边气田马五₁₋₄主要成岩作用示意图
Fig. 1 Main diageneses of Ma5₁₋₄ submember of Jingbian Gas Field

潮下带沉积微相: 主要由纹层泥—细粉晶白云岩、(含)泥质白云岩、云质泥岩、泥岩及含云质灰岩组成 其中泥质云岩、云质泥岩、凝灰质泥岩约占潮下

带微相 70% 以上。以发育潮下低能微相为特征 潮下高能水动沉积很少; 仅在东部地区少数井某些层位发现了少量颗粒白云岩。例如 陕 200 井区陕 69 井

马五₁⁴小层中见泥晶藻屑砂屑白云岩; G24~29井马五₂²见少量亮晶砂屑白云岩。潮下带高能水动力沉积的匮乏,表明鄂尔多斯陆表海以局限的水域为主。

3 成岩作用和成岩环境

靖边气田马五₁₋₄亚段经历了近地表成岩环境(海底、潮坪、大气水)、表生成岩环境、浅一中埋藏成岩环境、深埋藏成岩环境(图1)。

3.1 近地表成岩环境主要成岩作用

蒸发潮坪中主要成岩作用是准同生白云石化作用和准同生膏化作用。颗粒碳酸盐岩海底胶结作用极少发生。潮上带和潮间带上部文石质泥或高镁方解石泥,在地表氧化条件下,通过“毛细管浓缩模式”被抽吸的卤水镁离子交代形成准同生白云石,其特征是灰黄、土黄色,泥晶—细粉晶,晶体较脏,泥质含量较高,白云岩呈页状、薄层或中层状产出。X衍射分析表明准同生白云岩为略富钙的白云石,有序度较低。并且在阴极发光下通常不发光或发不均匀的暗淡红色光。另一方面,咸水泻湖中还原条件下可直接沉淀形成含铁白云石。这种条件下,灰色、深灰色白云岩呈层状、透镜状、断续纹层状夹于石膏或石盐岩中。

蒸发潮坪中常见准同生膏化作用。潮上带咸化的海水进一步浓缩成卤水,硫酸钙达到过饱和,因此有大量石膏晶体析出,并交代白云石。在高日照温度和超咸卤水条件下,准同生石膏很快脱水转变为硬石膏。潮上带的硬石膏结核呈近圆状,其中常包含未被完全交代的准同生白云石。间歇性暴露大气的潮间带上部常形成细棒状硬石膏晶体。

陆表海潮坪是一种较低能的潮坪环境,海底胶结作用不发育,偶见砂屑白云岩中有少量马牙状胶结物。另外,未见与强水动力条件相伴的颗粒泥晶化作用。

潮坪环境沉积物会短暂暴露于大气,接受大气淡水作用可能引起溶蚀作用,但由于大气淡水进入沉积物中与卤水混合很容易达到饱和状态。因此,蒸发潮坪中早期的淡水溶解作用是极有限的,可以忽略不计。

3.2 表生成岩环境主要成岩作用

在马家沟组沉积之后,华北地台整体抬升,马家沟组遭受长达1.3亿年的风化剥蚀作用。靖边气田主体处于古岩溶地貌的斜坡上,其西边是岩溶侵蚀高地,东边是岩溶平原和盆地。马五₁₋₂亚段以渗流带选择性溶解作用为主;马五₃₋₄亚段潜流带溶蚀作用相对发育。由于是干旱气候条件下裸露的风化壳岩

溶作用,溶蚀垮塌角砾岩虽在马五₁₋₄亚段均可见,但总体上不甚发育,落水洞和地下暗河地貌更是见不到。季节性地表径流相对发育及下切作用较明显,古沟槽是径流的汇聚之处。支沟槽由东向西延伸、会聚成主沟槽,近东西向展布,大致与古地形倾斜方向一致。

干旱气候条件下常年雨水不充沛,表生成岩环境经历的主要是选择性溶解作用、少量溶蚀角砾化、去白云石化作用、渗流粉砂白云石等充填作用等。选择性溶解作用使岩石中石膏结核和晶体膏被溶解成孔隙。许多石膏晶模今仍保持着其完好的晶形而无扩溶现象。地表淡水淋滤下还发生了去白云石化作用,去白云石化作用常形成粗粒状方解石,灰岩中保留较多泥晶白云石残余。

(硬)石膏结核被溶蚀成成孔隙时伴随着渗流粉砂白云石充填,其一部分来自石膏结核中包裹的白云石晶粒,另一部分来自渗流通道带来的白云石晶粒。

3.3 浅一中埋藏成岩环境的主要成岩作用

浅埋藏成岩环境,马五₁₋₄亚段经历了成岩作用包括:泥质充填作用、压实作用、早期亮晶方解石胶结和石英胶结、新生变形和重结晶作用。浅埋藏阶段压实作用对马五₁₋₄亚段白云岩影响不大,显微镜下偶见颗粒白云岩中鲕粒或砂屑略为压扁。现今白云岩中石膏结核模和石膏晶模基本保持原状未变形;说明进入埋藏阶段时,颗粒白云岩尚未完全固结,而准同生含膏白云岩已基本固结成岩。溶孔中发生早期亮晶方解石胶结,早期细粒状白云石胶结。浅埋藏环境,晚石炭世含煤沼泽盆地的酸性底层水向下渗流溶蚀,进一步改造溶缝、溶洞。在略酸性地层水条件下会产出少量自生石英(地层水中SiO₂含量不多)。在古侵蚀面之下30m范围内,由与碳酸盐古风化壳有关的自生矿物高岭石,呈六边形集合体充填于较大溶孔(图版I-6)和裂缝中。

中埋藏成岩环境,埋深约1000~2600m,地温50~100℃。马五₁₋₄亚段经历的成岩作用包括:烃类成熟早期溶蚀作用;溶孔中充填矿物有亮晶方解石、自形亮晶白云石胶结物、自生矿物高岭石。烃类成熟早期有机质释放出大量有机酸和CO₂,地层水呈弱酸性溶解能力增加,对溶孔中早期充填的渗流粉砂白云石、方解石胶结物(图版I-3)和白云石胶结物进行溶解。溶孔中充填的渗流粉砂白云石被溶成“蜂巢状”或“超大孔隙”(图版I-4,2)。当地层水中碳酸盐达到饱和状态时,发生亮晶方解石胶结或亮晶白云石胶

结,中期亮晶方解石阴极发光下呈精致的环带状发光。自形亮晶白云石胶结物在阴极射线下发昏暗红光—明亮红光。浅一中浅藏环境还发生了埋藏白云石化作用,但仅影响局部地区,产生了数量不多的粗粉晶—细晶白云岩。

3.4 深埋藏成岩环境的主要成岩作用

深埋藏成岩环境,埋深大于2 600 m,地温100~160℃甚至更高。烃源岩进入生油窗且油侵入储集空间,随温度上升烃类将发生裂解,焦沥青开始生成。溶孔中充填矿物有晚期亮晶方解石(图版I-5)、鞍状白云石、萤石。晚期亮晶方解石胶结物不发光,较多 Fe^{2+} 进入亮晶方解石,造成 Fe/Mn 值过高而使方解石不发光。鞍状白云石具有弯曲的晶格和解理,呈扫描式波状消光(图版I-4),形成温度110~150℃,富含 Fe^{2+} 在阴极射线不发光。萤石(CaF_2)和晚期黄铁矿是地下热液矿物。少量萤石充填溶孔盈余空间(图版I-7);黄铁矿常沿马家沟组顶部不整合面缝洞系统侵染。晚期(硬)石膏充填孔隙或交代亮晶方解石(图版I-7),常保留着方解石的晶体轮廓。在维持孔隙水酸性条件下,高岭石向结晶程度较高的地开石转变,微晶间孔略有增加。

浅一中深埋藏成岩环境中马五₁₋₄亚段经历了如此复杂的各种成岩作用。但决定白云岩中早期表生溶孔能否得以保存,影响储层质量的成岩事件是:①埋藏溶解作用发育程度;②矿物充填作用(充填矿物种类和充填程度)。这两类成岩作用是相互联系的。当浅一中埋藏阶段溶解作用发育时,溶孔中渗流粉砂白云石和早期亮晶方解石遭溶蚀,甚至早期溶孔有所扩大,地层水介质略偏酸性,抑制亮晶方解石沉淀,仅有少量自生石英形成,或许有少量高岭石、地开石充填,溶孔保存得较好,为油气充注提供条件,最终形成溶蚀孔洞白云岩储层。当浅一中埋藏阶段溶解作用欠发育时,溶孔中渗流粉砂白云石和早期亮晶方解石基本保持原状,地层水介质略偏碱性,大量亮晶方解石及鞍状白云石充填,不利于储集空间的保存,溶蚀孔洞甚至被完全填满殆尽。上述是两个端元情况,实际许多情况是介于这两个端元之间的。萤石、黄铁矿及伊利石充填孔隙,(硬)石膏交代方解石等现象较少见,其对储层孔隙演化整体上影响较小。

4 沉积—成岩微相研究方法

碳酸盐岩沉积微相与成岩相两者是具有内在联系的。靖边气田马家沟组顶部风化壳型储层成岩作

用途和产物对储层的影响目前已比较清楚。潮上带和潮间带上部准同生白云岩及硬石膏结核和晶体是形成储层的物质基础;表生岩溶期马五₁₋₂亚段白云岩中膏质全被选择性溶解则构筑了储层的基本轮廓;埋藏期溶解作用对早期溶蚀孔洞进行改造;浅一中深埋藏成岩期充填矿物种类和数量,决定着溶蚀孔洞能否保存和储层最终状态。

区块储层综合评价中,将沉积微相和成岩相两者有机地结合在一起。以简约的方式,用一套简明的数字组合符号半定量地表达沉积微相和主要成岩作用。譬如,对于一些潮下带和潮间带下部不大可能成为储层的岩石类型,以简单数字符号组合表示岩相,其成岩相表达略去。潮上带(含)膏质泥晶—细粉晶白云岩和潮间带上部含膏泥晶—细粉晶白云岩,其成岩变化较复杂,不同区块不同小层的成岩途径和结果有多种,因此用多重数字符号组合来表征沉积微相和成岩相。沉积—成岩微相研究方法是本文的创新点,它的优点在于通过数字符号组合,半定量地表达了以往描述性的沉积成岩内容,并应用于编制沉积微相展布图和成岩作用分区图,储层发育的有利区带一目了然。该方法在靖边气田区块储层预测上取得了较好的效果,便于应用和推广。

4.1 潮下带沉积—成岩微相

1-1 深灰、灰色具纹层泥—细粉晶白云岩。水平纹层或近水平微波状纹层,含少量陆源泥或细粉砂,可能有生物潜穴。经历的成岩作用以早期白云石化、压实作用和重结晶作用为主。重结晶作用使晶粒不均匀地略变粗。岩性致密均匀。

1-2 均匀泥晶白云岩,结构均一、细腻、无明显纹层。经历的成岩作用与微相1-1相似。岩性致密均匀。

1-3 颗粒白云岩,该微相在靖边气田产出少。可以细分为1-3-A(鲕粒白云岩)和1-3-B(砂屑白云岩)。成岩作用主要为近地表白云岩化、早期海底细粒状白云质胶结作用、压实作用和新生变形作用。鲕粒结构基本保存。岩性一般致密均匀。

1-4 砾屑白云岩,砾屑为单一的泥晶白云石成分,或者夹有一些灰质,砾屑磨圆较好。填隙物为通常为白云石基质。经历了白云石化作用,同生砾屑化作用,海底胶结作用很弱,压实作用中等,岩性致密。

1-5 云质泥岩,较均一,常具水平纹层,规则或不规则。经历了早期云化作用、压实作用。岩性致密均匀。

1-6(含)泥质白云岩,结构较均一,有规则纹层。经历成岩作用与微相1-5相似。岩性致密均匀。

4.2 潮间带沉积—成岩微相

4.2.1 无膏泥晶—细粉晶白云岩类

2-1 藻纹层泥—细粉晶白云岩,富泥纹层、富屑纹层规则相间,多呈波状。可有生物扰动迹象。经历成岩作用以早期白云石化、压实作用和重结晶作用为主。重结晶作用使晶粒不均匀略变粗。岩性致密均匀。

2-2 鸟眼泥—细粉晶白云岩,具鸟眼孔或窗格孔,可为粒状白云石充填(2-2-A)或粒状方解石充填(2-2-B)。经历早期白云石化、早期充填作用、压实作用和重结晶作用,鸟眼孔极少保存下来。岩性致密均匀。

2-3 块状泥—细粉晶白云岩,晶粒均一而结构粗糙,为强烈生物扰动所致。所经历成岩作用与微相2-1相似。

2-4 球粒泥—细粉晶白云岩,可分亮晶球粒云岩和泥晶球粒云岩。所经历成岩作用是早期白云石化、海底胶结作用、压实作用和重结晶作用。岩性致密均匀。

2-5 隐藻粒屑白云岩,富含有机质的隐藻丝状体和隐藻屑。所经历成岩作用与微相2-1相似。

2-6 晶粒白云岩,包括粉晶、细晶白云岩。晶粒白云岩一般比较纯,泥质含量极少,晶粒大小较均一,晶粒为它形—半自形。晶粒白云岩是成岩交代作用造成的。考虑到其中未见有颗粒结构残余和幻影,泥质含量极少;又不含石膏结核和晶体印模和幻影,没有潮上带或潮下带的痕迹,暂且将细晶(粗粉晶)白云岩放在潮间带。晶粒白云岩常形成孔渗性较好的储层。

4.2.2 含石膏晶模泥晶—细粉晶白云岩类

蒸发潮坪潮间带上部产原岩为(含)石膏晶模泥晶—细粉晶白云岩。石膏晶模呈板状、长条状或细棒状,含量5%~30%。该类微相经历的主要成岩作用是表生岩溶期的溶解作用、后来的各种矿物充填作用,压实作用相对弱,常见白云岩中板状、长条状晶模完全没有变形。孔隙能否保存取决于晶模溶孔中充填的矿物种类和程度。晶模溶孔被矿物质全充填、半充填和未充填的现象都较常见。这一类沉积—成岩微相用下列式表示:

$$3-(1\ 2\ 3\ \dots) - 0\ 1\ 2\ 3\ 4 \quad \text{式1}$$

式中前面数字3表示原岩为含石膏晶体泥晶—

细粉晶白云岩。括号中数字1、2、3……表示晶模溶孔中充填的矿物;式后面的数字表示溶孔的充填程度。其表达方式与下面叙述的潮上带沉积—成岩微相完全一致,而且后者较为典型,故在此不赘述。

4.3 潮上带沉积—成岩微相

潮上带亚相沉积的是(含)膏质泥晶—细粉晶白云岩,其经历的对孔隙演化起关键作用的成岩作用是:表生期淡水溶解后成为溶蚀孔洞白云岩,其之后各成岩期各种矿物充填作用;受压实作用微弱,今石膏结核溶孔基本上保持圆状和近似圆状而未压扁,在进入埋藏环境之前白云岩已基本固结成岩。一般来说,马五₁₋₂含膏白云岩中(硬)石膏一般都遭溶解,孔隙是否能以保存主要取决于充填矿物类型和充填程度。用下面式子表示其沉积—成岩微相:

$$4-(1\ 2\ 3\ \dots) - 0\ 1\ 2\ 3\ 4 \quad \text{式2}$$

式中前面数字4表示原岩为(含)石膏结核泥晶—细粉晶白云岩。括号中数字1、2、3……表示溶孔中充填矿物:1表示溶孔被渗流粉砂白云石充填;2溶孔被粗晶或块状白云石充填;包括白色亮晶白云石和鞍状白云石;3溶孔被亮晶方解石充填;亮晶方解石是分布最广、数量多的胶结物,其充填作用显著。4表示溶孔被石英、玉髓硅质矿物充填,绝大多数情况是石英。5溶孔被粘土矿物充填,多数是高岭石—地开石,扫描电镜下可见少量伊利石。6溶孔被渗流方解石充填,这种情况不常见,渗流粉砂方解石可能是渗流粉砂白云石被交代形成的。7溶孔被石膏和硬石膏充填,或者是未溶解完残留的石膏和硬石膏。8溶孔被萤石充填。膏核溶孔常被几种矿物充填,括号中最前面的数字代表主要充填矿物,后面数字代表的充填矿物数量依次减少。

式1和式2后面的数字表示溶孔矿物充填程度。0表示溶孔完全未被充填,这种情况是罕见的,多少有一点矿物充填;1表示弱充填(充填矿物占原溶孔体积<30%);2代表中等程度充填(充填矿物占原溶孔体积30%~70%);3代表表示强充填(70%~95%);4代表全充填(充填矿物占原溶孔体积>95%)。

例:某白云岩样品,石膏结核溶孔被渗流粉砂白云石、石英及高岭石半充填(充填物占溶孔50%),其沉积—成岩微相表达式为4-(1、4、5)-2。

4.4 其它沉积—成岩微相

5-1 岩溶角砾岩,角砾以白云岩为主,分选和磨圆很差。有些角砾上可见原先溶孔或藻纹层。角

砾间被渗流粉砂白云石、粘土质充填, 或者被亮晶方解石和亮晶白云石胶结。少数情况下岩溶角砾能成为储层, 储集空间是被白云石部分胶结充填的残留砾间孔。

5-2 次生晶粒灰岩, 次生去白云石化是一种表生环境的次生成岩作用, 原岩是本区潮间、潮上带甚至潮下带准同生白云岩, 经历去白云石化成为次生晶粒灰岩。次生方解石晶粒较粗, 其中常包含残留泥晶白云石。因氧化作用次生晶粒灰岩呈褐红色。

5 “负胶结物孔隙度”和溶蚀孔洞充填物统计

Rosenfeld 研究碎屑岩时提出负胶结物孔隙度概念 (minus cement porosity), 定义为“把胶结物全部溶掉后所得的孔隙度”, 即在胶结作用发生之前砂的孔隙度^[10]。此引申此概念来研究碳酸盐岩风化壳型储层。在加里东期表生岩溶环境下, 泥—细粉晶白云岩中石膏结核和石膏晶体被选择性溶解形成最初溶蚀孔洞, 后来被几种矿物部分充填 (少数情况矿物充填全部孔洞) 而成为储集层。埋藏环境下溶解作用对早期溶孔中充填矿物进行溶蚀改造, 晚期溶解基本上未超出早期溶孔的范围。本文将现今薄片的面孔率, 加上溶孔中所有胶结物面积, 称之为马五₁₋₄亚段的“负胶结物孔隙度”, 后来构造裂缝形成的储集空间不在统计内。表生成岩期未被溶解掉的白云岩中硬石膏

结核 (晶体) 是潜在的“孔隙” (图版 I-8), 它还能反映表生岩溶期的溶蚀淋滤强度, 因此也将它们放在“负胶结物孔隙度”统计中。“负胶结物孔隙度”近似等于表生岩溶期白云岩的孔隙度, 也近似等于准同生期马五₁₋₄亚段白云岩中硬石膏含量。“负胶结物孔隙度”是沉积微相对储层的控制作用在薄片中的表现, 应用于靖边气田马五₁₋₄亚段储层研究, 效果较好。

对陕 200 井区马五₁³、马五₁²、马五₁⁴、马五₂² 四个主力产层的薄片“负胶结物孔隙度”与“面孔率”的进行统计。马五₁³、马五₁²、马五₁⁴小层中“负胶结物孔隙度”与“面孔率”呈正比关系。并且从图中可以看出, 马五₁³小层沉积微相条件最佳, 其“负胶结物孔隙度”值 ≥ 15% 占 38.64%; 马五₁²小层“负胶结物孔隙度”值 ≥ 15% 仅占 8.51%; 而马五₁⁴小层“负胶结物孔隙度”值 ≥ 15% 仅占 18.75%。需要说明的是马五₁⁴小层中, “负胶结物孔隙度”与“面孔率”完全相等的的数据 (18:18, 7:7, 3:3) 来自靖边气田中为数不多的细晶白云岩或粗粉晶白云岩, 储集空间为晶间孔和晶间溶孔, 属于晶粒白云岩孔隙系统。马五₂²小层的“负胶结物孔隙度”与“面孔率”相关性不明显, 甚至是呈负相关, 暗示着其储层成因与其它主力产层有些差别。马五₂²小层白云岩常发育水平纹理, 其抗张强度比无纹理白云岩要小 2/3。岩心观察表明本区马五₂²中白云岩水平裂缝较发育, 岩心常呈薄饼状, 常构成孔隙—裂缝型储层。

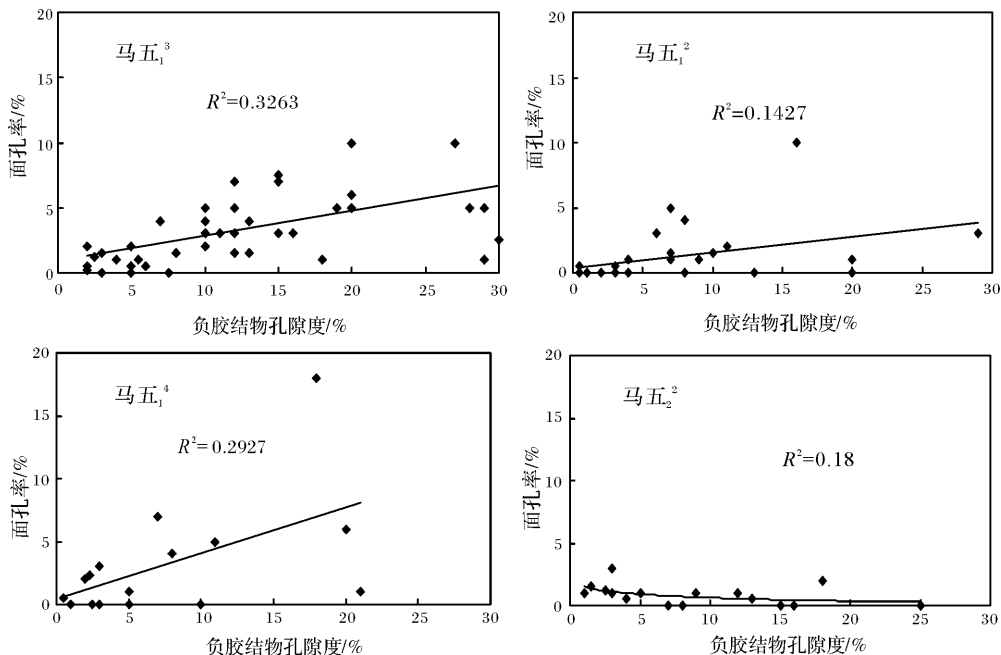


图 2 靖边气田陕 200 井区白云岩“负胶结物孔隙度”与面孔率之间的关系

Fig. 2 “Minus cement porosity” and surface porosity of the dolomite of Shan 200 wellblock of Jingbian Gas Field

6 成岩作用分区评价(以陕200井区马五₁³小层为例)

根据测井解释数据和生产测试数据统计,陕200井区马五₁₋₄亚段中马五₁³小层是最重要的产气层,它是马五段储层评价的重点。在薄片鉴定和溶蚀孔隙充填物统计基础上,编制了陕200井区马五₁³溶蚀孔隙充填物分布图(图3)。以饼状图方式表示了区块中白云岩“负胶结物孔隙度”、面孔率和溶孔中充填矿物分布情况。为了简明,对充填矿物进行了归类,石膏和硬石膏归为一类;自生石英与隐晶质玉髓归为一类;渗流粉砂白云石和亮晶白云石胶结物归为一类;高岭石—地开石、黄铁矿、以及不常见的萤石、伊利石及伊蒙混层矿物统统归入“其它”一类。

在沉积—成岩微相分析和溶蚀孔隙充填物统计基础上,编制了陕200井区马五₁³成岩作用分区图(图4)。其它几个小层(马五₂³、马五₄¹、马五₂²)由于薄片数量少,仅编制了沉积—成岩微相分布图(篇幅所限未

展示)。

根据沉积—成岩微相分布情况,溶蚀孔隙和矿物充填情况,陕200井区马五₁³划分了A、B、C区3个成岩区(图4)。

A区位于陕200井区的西部,潮上带膏质云坪(白云岩中原始石膏含量 $\geq 15\%$)和潮上带含膏云坪(白云岩中原始石膏含量 $15\% \sim 5\%$)沉积微相带较为有利。“负胶结物孔隙度”较高(平均 16.93%)、面孔率也较高(平均 5.76%)。属于溶蚀作用强且强一半充填区。北半区溶孔中充填物以渗流粉砂白云石为主,其次为石英、高岭石和亮晶方解石。沉积—成岩微相:4-(1A3)-23;4-(1A5)-3;4-(15A)-23。南半区溶孔中充填物以渗流粉砂白云石为主,其次为亮晶白云石和亮晶方解石。沉积—成岩微相:4-(1)-2;4-(12A)-2;4-(15A)-3。A区储层发育条件最好,北面的G16-19井附近和南面的陕21井附近属于比较成熟的开发区,布井较密且已获得较多中高产气井,其余布井较稀的地区应有较好的开发前景。

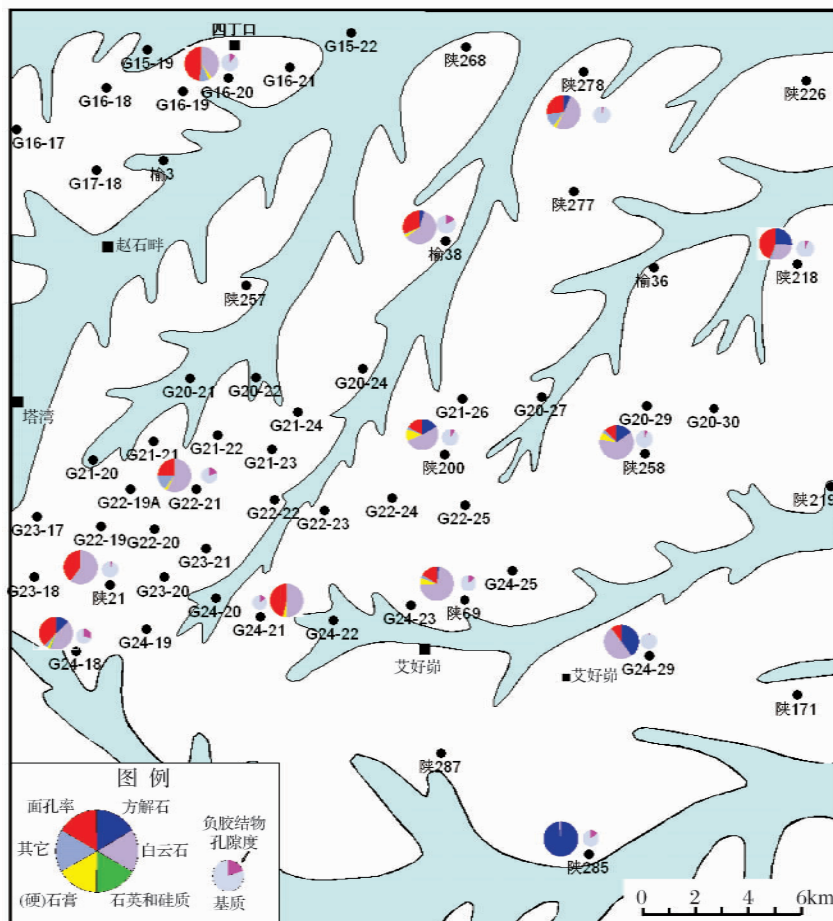


图3 靖边气田陕200井区马五₁³溶孔充填物分布图

Fig. 3 Distribution graph of fillers in dissolution pore of Ma5₁³ sublayer of Shan 200 wellblock of Jingbian Gas Field

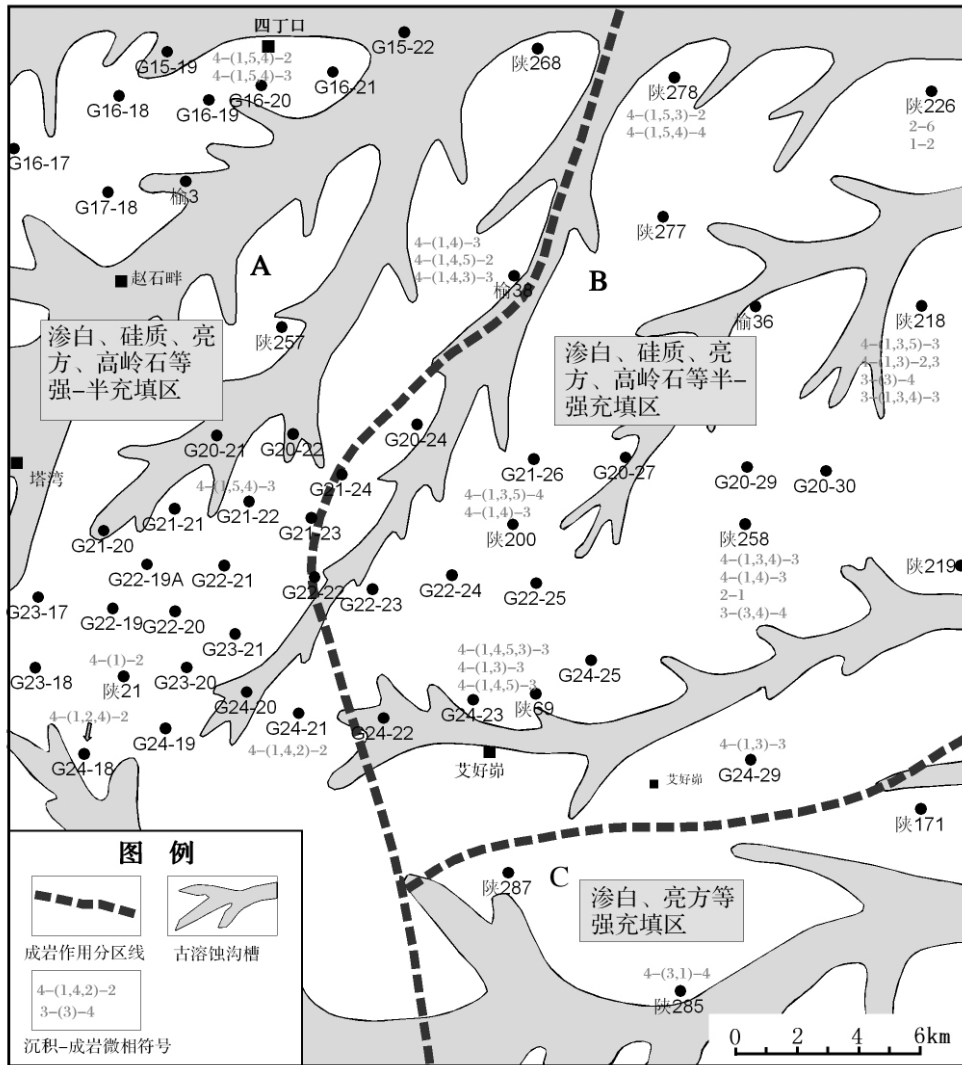


图 4 靖边气田陕 200 井区马五₁ 成岩作用分区图

图中简写说明: 渗白: 渗流粉砂白云石; 硅质: 自生石英及玉髓; 亮方: 亮晶方解石

Fig. 4 Distribution graph of diageneses of Ma₅¹ sublayer of Shan200 wellblock of Jingbian Gas Field

B 区位于陕 200 井区北东部(图 4),“负胶结物孔隙度”中等至低(平均 9.76%),面孔率中等(平均 2.24%),属于溶蚀孔不太发育且半-强充填区。溶孔中充填物以渗流粉砂白云石为主,其次为石英、亮晶方解石、高岭石,而且向东溶孔中充填物亮晶方解石明显增多(图 3)。B 区储层发育条件不如 A 区好,向东溶孔充填作用增强不利于储层发育,B 区目前布井较稀,获得工业气流以中、低产井为主。B 区仍有一定的开发潜力。

C 区位于陕 200 井区东南部(图 4),有三口探井。从陕 285 井少量薄片来看,溶孔被亮晶方解石和渗流粉砂白云石强-全充填,对储层发育不利。

7 结论和认识

(1) 鄂尔多斯盆地靖边气田马五₁₋₄亚段属于陆表海台地蒸发潮坪相,其分潮上、潮间、潮下三个亚相和若干个微相。有利于形成储层的岩相是:①潮上带(含)石膏结核泥-细粉晶白云岩;②潮间带含石膏晶模泥-细粉晶白云岩;③晶粒白云岩可能源自潮间带沉积,其数量很少且分布局限。

(2) 马五₁₋₄亚段碳酸盐岩经历了近地表环境、表生岩溶成岩环境、浅-中深埋藏成岩环境多种成岩作用。对储层形成和演化起关键作用是:准同生期白云石化和膏化作用奠定了储层的物质基础;表生岩溶

期是碳酸盐岩风化壳储层形成的关键时期,对白云岩中膏质选择性溶蚀形成了储层的基本轮廓;浅—中埋藏期溶解作用对早期孔洞进行了改造;埋藏期孔洞缝矿物充填的种类和数量决定着早期溶蚀孔洞能否保存和储层最终状况。另外,为数不多的晶粒白云岩是埋藏条件下形成的。

(3) 在靖边气田小区块马五₁₋₄亚段储层综合评价中,将沉积微相和成岩相研究有机地结合在一起。在沉积微相基础上,加强了对白云岩早期溶蚀孔洞能否保存的埋藏溶解作用和矿物充填作用的研究。以简约的方式,用一套简明的数字组合符号,半定量地表示沉积微相和成岩相。该方法便于统计和掌握储层溶蚀孔洞充填物分布情况,由此而改进了小层成岩作用分区图的作图方法,在分区块评价和预测马五₁₋₄亚段储层上取得了良好效果。

(4) 引申“负胶结物孔隙度”概念,更直观地反映沉积作用对靖边气田马五₁₋₄储层发育的影响。将现今薄片的面孔率,加溶孔中所有胶结物面积,称之为马五₁₋₄亚段的“负胶结物孔隙度”,后来构造裂缝形成的储集空间不计在内。“负胶结物孔隙度”近似等于表生岩溶期马五₁₋₄亚段白云岩的孔隙度,也近似等于准同生期白云岩中硬石膏含量。因此,“负胶结物孔隙度”是沉积微相对储层的控制作用在薄片中的表现,应用于靖边气田马五₁₋₄亚段储层研究,效果较好。

参考文献(References)

- 冯增昭,鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟期岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 1-8 [Feng Zengzhao, Bao Zhidong. Lithofacies paleogeography of Majiagou age of Ordovician in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 1-8]
- 付金华,郑聪斌. 鄂尔多斯盆地奥陶纪北海和祁连海演变及岩相古地理特征[J]. 古地理学报, 2001, 3(4): 25-33 [Fu Jinhua, Zheng Congbin. Evolution between North China Sea and Qilian Sea of the Ordovician and the characteristics of lithofacies palaeogeography in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(4): 25-33]
- 王少飞,闫少雄,黄道军,等. 鄂尔多斯盆地东部马家沟组马五₁₋₄段沉积微相研究[J]. 低渗透油气田, 2007, 12(3-4): 35-39 [Wang Shaofei, Yan Shaoxiong, Huang Daojun, et al. Sedimentary microfacies of Ma5₁₋₄ sub-member of Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin[J]. Low Permeability Oilfield, 2007, 12(3-4): 35-39]
- 黄月明,马振芳. 陕甘宁盆地中部气田白云岩储层孔洞充填物与储集性[C]//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: 101-106 [Huang Yueming, Ma Zhenfang. Filler of pore and hole and capability of dolomite reservoir of center Gas Field of Shanganning Basin[C]//Exploration and Development of Oil and Gas of Ordos Basin Symposium 1990-2000. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 101-106]
- 彭军,田景春,赖生华. 陕甘宁盆地中部马家沟组白云岩成因及储集性[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25(1): 87-93 [Peng Jun, Tian Jingchun, Lai Shenghua. The origin and reservoiring performance of dolostone of Majiagou Formation in the middle part of the Gas Field of Shan-Gan-Ning Basin[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1998, 25(1): 87-93]
- 韩征,辛文杰. 准同生白云岩形成的机理及其储集性——以鄂尔多斯盆地下古生界主力气层白云岩为例[J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 226-230 [Han Zheng, Xin Wenjie. Genetic mechanism and reservoir property of penecontemporary dolostones: The example of the major pay dolostones Lower Paleozoic, Ordos region[J]. Earth Science Frontier, 1995, 2(2-4): 87-93]
- 任文军,张庆龙,张进,等. 鄂尔多斯盆地中央古隆起板块构造成因初步研究[J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23(2): 191-196 [Ren Wenjun, Zhang Qinglong, Zhang Ji, et al. The plate tectonic formation of the central paleouplift in the Ordos Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1999, 23(2): 191-196]
- 雷卞军,张吉,王彩丽,等. 高分辨率层序地层对微相和储层的控制作用——以靖边气田统5井区马五段上部为例[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(1): 1-7 [Lei Bianjun, Zhang Ji, Wang Caili, et al. Control of high resolution sequence stratigraphy on microfacies and reservoirs: A case from the upper Ma5 member in Tong5 wellblock, Jingbian Gas Field[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(1): 1-7]
- John K Warren. Sulfate dominated sea-marginal and platform evaporative settings: Sabkhas and Salinas, Mudflats and Salterns[C]//Melvin J L, Editor. Evaporites, Petroleum and Mineral Resources, Developments in Sedimentology 50. 1991: 69-187
- 刘宝珠主编. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社, 1980: 133 [Liu Baojun. Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 133]

Research on the Sedimentary Microfacies and Diageneses of Ma5₁₋₄ Submember in Jingbian Gas Field

LEI Bian-jun¹ LU Tao² WANG Dong-xu² WANG Yong² LI Shi-lin¹ GU Shao-fu¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500;

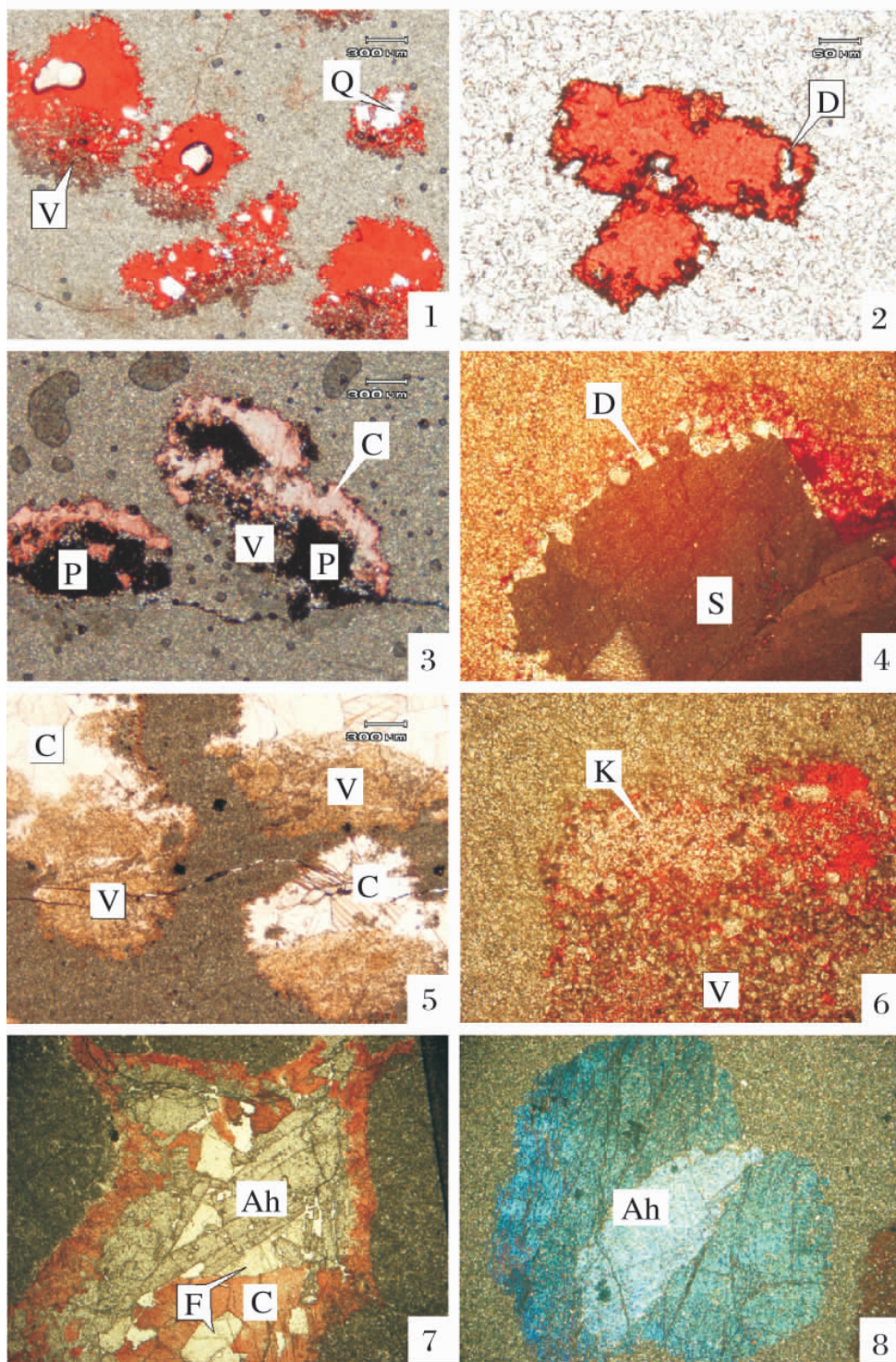
2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development of Changqing Oilfield Company, Xian 710021)

Abstract Majiagou Formation of the middle part of Ordos Basin belong to epeiric sea carbonatites and evaporates. Majiagou Formation have Ma1 Ma6 Member(from bottom to top) , Ma1 , Ma3 , Ma5 Members are micrite-fine powder dolomite , gyprock and saline. Ma2 , Ma4 , Ma6 Members are mainly micrite limestone or wackestone. Caledonian e-vent uplift North China Platform since last stage of Middle Ordovician. The top of Majiagou Formation in Ordos Basin ndergo weather worn in 1300 million endurance. Weathered crust dolomite reservoir of the top of Ma5 Member are produced by dissolution of ancient karst. Ma5 member divided into Ma5₁₀ , Ma5₉...Ma5₁ from bottom to top. The producing pay allocation in Ma5₁₋₄ submember which are top of weather crust. Ma5₁₋₄ submember have thick 80 ~ 110 m , are dolomite , argillaceous dolomite , minor gypseous dolomite and tuffaceous mudstone. The reservoir rock of Ma5₁₋₄ submember are mainly corrosion pore and hole dolomite , valid reservoir are grand total 2 ~ 10 m , which initial rock are gypseous micrite-fine powder dolomite.

Ma 5₁₋₄ submember of Jinbian Gas Field in Ordos Basin belong to evaporated carbonate tidal flat facies , which divided into three subfacies: supratidal zone , intertidal zone , infratidal zone , and 18 microfacies. The microfacies that are favour of developing reservoirs are supratidal zone dolomite which have anhydrite noddle and upper part intertidal zone dolomite which have anhydrite crystal. Ma5₁₋₄ Submember had undergone various diageneses. Penecontemporaneous dolomitization and gypsification that settled material base of reservoirs. Epidiagenesis selective dissolution of gypseous dolomite constructs the ambit of reservoirs. anhydrite noddle and crystal in dolomite selectively dissolved by meteoric fresh water and create pore and hole. Dissolved pore and hole what partly fill by one or some mineral form reservoirs. Early stage dissolution pore and hole are reconstructed by burial period dissolution , fill mineral sort and amount that determine the preservation condition of dissolution pore and the feature of reservoirs.

Call in “minus cement porosity” , it directly reflects sedimentary that control reservoir Ma5₁₋₄ Submember. Combining of research microfacies and diagenesis facies , use concise numerical symbol that express semiquantitatively sedimentary microfacies and diagenesis facies. Used that in compilation microfacies chart and diagenesis partition chart , beneficial area for reservoir is so clearly. That method acquire approved effect on the evaluation and forecasting reservoir of Jingbian Gas Field.

Key words Jingbian Gas Field; Ma5₁₋₄ submember; sedimentary microfacies; diagenesis



图版 I 说明: 1. 白云岩溶孔中充填少量渗流粉砂白云石(V) 和自形石英(Q), 可见少量沥青。陕175井 3-117/157, 马五₁³, 单偏光(红色铸体薄片)。2. 石膏晶模孔埋藏溶解略微扩大, 有少量白云石胶结物, 孔壁上有沥青。陕175井 3-116/157, 马五₁³, 单偏光(红色铸体薄片)。3. 溶孔中充填渗流粉砂白云石和亮晶方解石, 两者明显被埋藏溶解呈蚕食状。G05-45井, 3 113.07 m, 马五₁³, 正交偏光。4. 白云岩溶孔中的自形亮晶白云石(D) 和鞍状白云石(S), 后者具弯曲的晶格和解理, 呈扫描式波状消光。陕69井 3 168.94 m, 马五₁³, 正交偏光(红色铸体), ×100。5. 石膏结核溶孔被全充填, 下部是渗流白云质粉砂(V), 上部是亮晶方解石(C), 单偏光, 统12井 4-6/80 2 991.13 m, 马五₁⁴。6. 溶孔被渗流粉砂白云石(V) 和高岭石(K) 半一强充填。G22-21井 2-50/107, 马五₁³, 单偏光(红色铸体), ×100。7. 溶塌角砾岩砾间孔隙被细粒—粗粒亮晶方解石(C)、硬石膏(Ah) 和萤石(F) 全充填。陕10井 6-6/38, 马五₂²。单偏光(茜素红染色), ×25。8. 白云岩中硬石膏结核(Ah), 其包含白云石粉晶。陕10井, 8-11/54, 马五₁^a, 正交偏光, ×25。