

靖边气田碳酸盐岩储层沉积-成岩演化模式

代金友¹, 铁文斌², 蒋盘良¹

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249
2. 中国石油新疆油田公司开发公司, 新疆克拉玛依 834000

摘要 靖边气田主产层次生溶蚀孔洞缝成层连片发育, 孔洞缝分布受沉积相和成岩作用双重控制。本文结合 98 口井岩心观察、1000 余块薄片鉴定及多种化验测试资料对储层沉积相、成岩作用进行了系统研究, 探讨了储层沉积-成岩演化模式及其对孔洞缝储层发育的控制作用。结果表明, 靖边气田储层为蒸发潮坪沉积, 并可细分为潮上带泥云坪、膏岩洼地、含膏云坪; 潮间带含藻云坪、泥云坪、颗粒滩、潮下带灰坪 7 种沉积微相; 储层埋藏主要经历了白云化、溶解、充填、破裂、交代、压实-压溶、角砾化和重结晶 8 种成岩作用; 储层沉积-成岩演化总体分为沉积同生期、近地表浅埋藏期、抬升风化期和后埋藏期 4 个阶段; 马五₁~马五₃、马五₄^{1a} 高孔渗段的形成主要受沉积同生期和抬升风化期溶解作用及含膏云坪、含藻云坪和颗粒滩微相控制, 而马五₃~马五₃、马五₄^{1b}~马五₄^{3b}、马五₅ 低孔渗段的形成主要受泥云坪、膏岩洼地和灰坪微相控制。

关键词 沉积-成岩演化模式; 成岩作用; 沉积微相; 碳酸盐岩; 靖边气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号 TE112.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)09-0068-06

Sedimentary and Diagenetic Evolution Pattern of Reservoir Bed of Carbonate Rock in Jingbian Gasfield of Ordos Basin

DAI Jinyou¹, TIE Wenbin², JIANG Panliang¹

1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Development Company, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Abstract Evaporation tidal flat facies are developed in the mid gas field of Ordos Basin. They can be subdivided into 7 microfacies, including mud-dolostone flat of the supralittoral zone, gypsaceous depression of the supralittoral zone, gypsaceous dolostone flat of the supralittoral zone, algae-dolostone flat of the intertidal zone, mud-dolostone flat of the intertidal zone, grain bank of the intertidal zone and limestone flat of the subtidal zone. Core observation and thin section analysis indicate that the diagenesis of reservoirs in the syngensis diagenetic environment, freshwater diagenetic environment and buried diagenetic environment include dolomitization, dissolution, filling cohesion, fracture, replacement, compaction-pressure solution, recrystallization, breccia, etc. Based on the analyses of sedimentary facies and the effect of diagenesis on porosity and permeability characteristics of reservoirs, the sedimentary-diagenetic evolutions of carbonate reservoirs are divided into 4 periods, namely sediment-syngensis diagenesis period, embedding diagenesis period, near floor, uplift-weathering period and late embedding diagenesis period. This unique evolution pattern constitutes vertical 5-layer reservoir architecture, including 2 high porous layers and 3 low porous layers, alternatively distributed. M5₁~M5₃ and M5₄^{1a} high porous layers are under the control of the paleokarst in sediment-syngensis diagenesis period, uplift-weathering period and the microfacies of gypsaceous dolostone flat, M5₃²~M5₃³, M5₄^{1b}~M5₄^{3b} and M5₅ low porous layers are under the control of mud-dolostone flat, gypsaceous depression and limestone flat.

Keywords evolution pattern; diagenesis; sedimentary microfacies; carbonate rock; Jingbian gasfield; Ordos Basin

收稿日期: 2010-01-07

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技攻关项目(2004110024000244); 中国石油天然气集团公司应用基础研究计划项目(06A100103); 石油科技中青年创新基金项目(06E1040)

作者简介: 代金友, 副研究员, 研究方向为开发地质学及油藏描述, 电子信箱: 110221750129833@sina.com

0 引言

靖边气田是中国陆上海相碳酸盐岩层系中首次发现和探明的特大型风化壳气田^[1],也是中国“西气东输”工程的重要气源之一。该气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中部的靖边—横山一带,勘探开发面积逾 3×10⁴km²。含气层为奥陶系马家沟组顶部碳酸盐岩风化壳储层,埋深 3100~3900m。

靖边气田储层由一套以溶蚀为主,经深度成岩作用改造的蒸发潮坪沉积组成,整体具有低孔、低渗、低丰度、低产的特点^[2]。岩心平均孔隙度为 6.2%,平均渗透率为 14.2×10⁻³μm²,

平均储量丰度 0.6×10⁸m³/km²,气井平均产能 3.8×10⁴m³/d。储层微裂缝发育^[3],孔隙类型以次生溶蚀孔隙为主,并伴有少量溶洞^[4]。

生产资料显示,储层的次生孔洞缝发育集中在马五₁~马五₃、马五₄^a 2 个高孔渗段(表 1),这种分布特点与储层沉积—成岩过程密切相关。为此,结合 98 口井的岩心观察、1000 余块薄片鉴定及多种分析测试资料对储层沉积微相、成岩作用进行系统研究,探讨储层沉积—成岩演化模式及其对孔洞缝储层发育的控制作用。

表 1 中部气田奥陶系含气层划分
 Table 1 Gassiness layers of ordovician on the mid gas field

段	亚段	层号	标志层	气层	钻遇井数/口	平均厚度/m	风化影响
马六		M ₆			111	2.5	
马五	马五 ₁	M5 ₁ ¹		1	279	5.1	风化、地层 缺失层位
		M5 ₁ ²		2	413	6.3	
		M5 ₁ ³		3	441	3.94	
		M5 ₁ ⁴	K ₁	4	474	4.97	
	马五 ₂	M5 ₂ ¹		5	502	3.2	
		M5 ₂ ²	K ₂	6	528	4.83	
	马五 ₃	M5 ₃ ¹		7	548	4.9	基本无地层 缺失,部分井 未钻穿
		M5 ₃ ²		致密层	556	9.4	
		M5 ₃ ³		致密层	552	10.5	
	马五 ₄	M5 ₄ ^{1a}		8	548	4.86	
		M5 ₄ ^{1b}	K ₃	致密层	542	7.86	
		M5 ₄ ²		致密层	479	11.1	
		M5 ₄ ^{3a}		致密层	388	8.1	
		M5 ₄ ^{3b}		致密层	307	9.6	
	马五 ₅	M5 ₅ ¹		致密层	235	13	
M5 ₅ ²			致密层	129	11.5		
马五 ₆ ~马五 ₁₀		未发现气显示					

1 沉积环境及沉积相

根据 98 口井岩心观察、1000 余块铸体和阴极发光鉴定资料分析发现,靖边气田马五₁~马五₅亚段岩石以晶粒结构为主,少见鲕粒、内碎屑。岩石中石膏、盐岩等蒸发矿物发育,干裂、溶斑、鸟眼、藻纹层、生物钻孔和扰动等构造类型丰富,反映了水体浅、能量低、循环不畅、干热蒸发的碳酸盐蒸发潮坪沉积环境。为此,综合应用岩心观察、薄片鉴定、电性特征以及录井等方面的资料,在岩性组合、岩石组分、物性变化特征及结构构造等特征研究基础上^[5],进行了沉积微相划分,共识别出潮上泥云坪、膏岩洼地、含膏云坪、潮间含藻云坪、泥云坪、颗粒滩和潮下灰坪 7 种微相类型。

1.1 潮上泥云坪

位于潮上带近岸一侧,大风暴潮时才被海水淹没。沉积物主要为泥质含量较高(>25%)的泥质云岩、云质泥岩或泥岩,多呈泥晶结构,成分以伊利石为主。沉积岩层中干裂、季

节性纹层发育,偶见虫孔遗迹,含少量风成石英等陆源碎屑物。该微相在马五₁₋₄均有分布。

1.2 潮上膏岩洼地

为潮上带内局部低洼地带,以持续的蒸发沉积为主,大风暴潮时有海水间歇供给。沉积物主要为浅灰或灰白色膏云岩、云膏岩和硬石膏岩,夹薄层状含泥云质膏岩和盐岩。石膏呈条带状、云朵状、团块状、结核状分布,含量一般>25%。沉积岩层大部分已发生变形,生物罕见。该类微相主要分布于马五₃亚段中下部及马五₄亚段。

1.3 潮上含膏云坪

含膏云坪位于潮上带向海一侧,只有大潮时才被海水淹没。沉积物以灰白色硬石膏结核泥粉晶云岩为主,云质含量>50%,硬石膏结核呈圆球形或椭圆形,直径 0.5~5mm,最大可达 10mm。沉积岩层具有溶斑、鸟眼、干裂、纹层、虫孔等构造类型,硬石膏结核铸模溶蚀孔洞十分发育。该类微相生物稀

填矿物包括白云石、铁白云石、方解石、铁方解石、硬石膏、石英、高岭石、地开石、萤石、黄铁矿、有机质等几十种,以白云石、方解石、硬石膏矿物为主,占充填物总量的95%以上。

早期充填作用主要发生于沉积同生期,充填物主要为混合水粉晶白云石及淡水方解石,主要充填于硬石膏结核铸模孔、膏盐晶模孔及网状成岩收缩缝中。中期充填作用主要发生于抬升风化期,充填物主要为淡水方解石、白云石、泥砂质、铝土质、机械破碎物,主要充填于硬石膏结核铸模孔、膏盐晶模孔和构造缝中。中期充填作用类型及程度受前石炭纪岩溶古地貌单元的控制。晚期充填作用主要发生于埋藏期,埋藏早期主要充填物为微晶石英、高岭石、地开石、黄铁矿;埋藏晚期主要为方解石、铁方解石、铁白云石、硬石膏、萤石和有机质、沥青等。

2.4 破裂作用

破裂作用是形成本区微裂缝的重要成岩作用。早期破裂作用发生于同生期,主要表现为成岩收缩缝(铁丝网缝)、硬石膏水化胀裂缝。镜下观察,成岩收缩缝缝长1~2cm,缝宽5~30 μm ,最宽50~60 μm ,半充填方解石、白云石和有机质。裂缝密度一般为3~8条/m。裂缝是由于脱水作用及矿物相态的变化,使岩石体积缩小而产生的,其特点是密集且有规律地在三维空间上展布。中期破裂作用发生于抬升风化期,主要表现为风化岩溶坍塌缝、溶解缝。晚期破裂作用发生于埋藏期,埋藏早期主要表现为燕山期构造缝,多形成X型剪切缝,细直、延伸远,多被粉晶方解石充填;埋藏晚期主要表现为喜山期构造缝,裂缝较平直,穿层能力强,多垂直层面,常被埋藏期方解石充填。

2.5 其他成岩作用

压实-压溶作用是马五₁~马五₅一种普遍的破坏性成岩作用,尤其是泥微晶白云岩、含泥(泥质)白云岩、白云质泥岩、膏云岩、云膏岩、膏岩、泥晶灰岩等,经压实-压溶作用后原生晶间孔隙被破坏殆尽,最终变为致密层。

角砾云化作用使白云岩破碎形成角砾岩,主要发生在风化壳附近。

自生矿物交代作用包括去白云石化(方解石交代白云石)和去膏化作用2种。去白云石化作用发生在古风化壳附近,多与白云质岩溶角砾岩共生,为一种破坏性成岩作用。去膏化作用主要发生于沉积同生期,表现为方解石交代硬石膏晶体形成石膏假晶,为一种破坏性成岩作用。

重结晶作用也叫新生变形作用,是在埋藏环境下白云石和方解石随着温度、压力增加,颗粒结晶程度重新调整,使细小的晶体变大、变粗。

3 沉积-成岩演化模式

在沉积微相及成岩作用研究基础上,考虑埋藏深度、储集空间演化、孔隙水特征、储集空间类型、沉积-成岩作用类型等因素,建立了适合本区地质特点的储层沉积-成岩演化

模式(图1),将储层沉积-成岩演化过程划分为沉积同生期、近地表浅埋藏期、抬升风化期和后期埋藏期4个阶段。

3.1 沉积同生期(早—中奥陶世 O_{1+2})

在稳定的蒸发湖坪环境下,文石泥和高镁方解石泥首先沉淀,石膏晶体和钾石盐其后晶出,石膏结核、条带状和层状石膏形成。最初,潮上带文石泥和泥晶方解石的准同生白云石化(蒸发泵)作用及潮间—潮下带文石泥和高镁方解石泥渗透回流白云石化作用形成的泥微晶白云岩发育大量原生晶间孔和晶间微孔,原始孔隙度可达60%~70%。但由于地壳和海平面的频繁振荡运动,使固结或半固结的白云岩经常暴露地表,处于地表大气淡水渗流环境中。在大气淡水、地下淡水和海水混合作用下,形成变盐度的混合水环境。在渗流、潜流带,早期形成的部分膏盐矿物发生选择性溶解,形成石膏结核铸模孔、膏模孔和盐模孔。由于暴露时间短、淡水供给有限,未能形成大规模的溶蚀孔洞体系,而形成溶蚀孔洞的雏形,孔隙分布严格受层面控制。沉积同生期孔隙组合为石膏结核铸模孔、白云石晶间孔、盐模孔、干裂缝及少量鸟眼孔等。

3.2 近地表浅埋藏期(中奥陶世 O_2)

在上覆沉积物的不断加积下,早期形成的白云石沉积物进入近地表浅埋藏环境。随着埋深的增加,温度、压力的不断增高,沉积物固结成岩。压实作用使白云石晶间孔和晶间微孔急剧减少,但仍保留了相当数量的原生白云石晶间孔和晶间微孔。由于沉积物脱水收缩和石膏脱水转化为硬石膏,成岩收缩缝发育。孔隙组合为白云石晶间孔、晶间微孔、膏模孔、盐模孔和成岩收缩缝。

3.3 抬升风化期(中—晚奥陶世 O_{2-3} —早石炭世 C_1)

加里东运动使本区抬升,储层进入风化期,经历了长达1.3亿年的风化剥蚀和大气淡水淋滤作用。本期储层溶解作用和破裂作用等建设性成岩作用强烈,溶解作用强度远大于充填作用强度,是储集空间的最重要的建设时期。其孔隙组合为白云石晶间孔、晶间溶孔、溶孔、溶洞、膏模孔、盐模孔、风化破裂缝、岩溶坍塌缝、硬石膏水化胀裂缝、溶缝等。

3.4 后期埋藏期(中石炭世 C_2)

由于区域性地壳沉降,研究区储层再次发生埋藏。埋藏早期(C_2 —二叠世P)地层埋深<2000m,古风化壳之上的石炭—二叠系煤系地层酸性压释水沿侵蚀面及裂缝向下渗入储层发生溶蚀,产生新的次生孔隙。但由于溶解作用明显小于充填和交代作用,储层孔隙空间发生损失。储层充填物主要有石英、高岭石和黄铁矿,充填的空间为早期溶解作用形成的溶蚀孔、洞、缝。其孔隙组合为白云石晶间孔、晶间溶孔、充填后残余溶孔和构造裂缝。埋藏晚期(晚三叠世T—),储层埋藏深度>2000m,有机质成熟脱羟基产生酸性水,对原有孔洞缝进一步溶蚀改造形成深埋次生溶蚀孔洞缝体系,同时发生强烈的晚期充填作用,充填物为异形白云石、粗晶方解石、硬石膏、地开石、萤石和沥青。

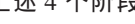
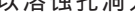
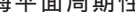
特征		沉积同生期 (O ₁₊₂)	近地表 浅埋藏期 (O ₂)	抬升风化期 (O ₂₊₃ -C ₁)	后埋藏期 (C ₂ -N)	
					埋藏早期 (C ₂ -K)	埋藏晚期 (T-N)
沉积 - 成岩环境		海底 - 地表	近地表	地表	埋深 <2000m	埋深 >2000m
储集空间演化趋势						
孔隙水特征		弱碱性咸化水, 混合水	大气淡水		酸性压释水	有机酸性水
古岩溶类型		层间岩溶		风化壳岩溶	缝洞系岩溶	
储集空间类型		溶孔, 晶间孔, 膏盐晶模孔, 干裂缝, 鸟眼孔	溶孔, 晶间孔, 膏盐晶模孔, 成岩收缩缝	溶孔, 溶洞, 膏盐晶模孔, 晶间孔, 晶间溶孔, 溶溶沟, 风化崩塌缝, 硬石膏水化胀裂缝	残余溶孔, 晶间孔, 晶间溶孔, 溶缝, 构造缝	残余溶孔, 晶间孔, 晶间溶孔, 溶缝, 构造缝
沉积作用	文石, 高镁方解石					
	石膏晶体, 石盐					
	石膏结核, 层状石膏					
白云石化	准同生					
	渗透回流					
	混合水					
	埋藏					
	硬石膏					
	钾石盐					
	白云石					
	方解石					
	溶解期次	早期		中期	晚期	
	粉晶白云石					
成岩作用	方解石					
	铁方解石					
	白云石					
	铁白云石					
	硬石膏					
	石英					
	高岭石					
	地开石					
	钾石盐					
	萤石					
破裂作用	充填期次	早期		中期	晚期	
	干裂					
	成岩收缩缝					
	硬石膏水化胀裂					
	风化破裂					
	岩溶坍塌					
	构造破裂					
	破裂期次	早期		中期	晚期	
	压实 - 压溶					
	角砾化					
其他作用	去膏化					
	去云化					
	重结晶					
						

图 1 中部气田储层沉积-成岩演化模式

Fig. 1 Sedimentary and diagenetic evolution pattern of reservoir bed in the mid gas field of Ordos Basin

靖边气田风化壳储层形成是上述 4 个阶段沉积-成岩演化综合结果,并最终表现为现今以溶蚀孔洞为主要储集空间、以微裂缝为渗滤通道的储集体。

4 沉积-成岩演化控制了孔洞缝储层分布

靖边气田储层沉积期由于受海平面周期性脉动的影响,纵向上沉积相带变化频繁。尤其是在后期成岩改造过程中经历了同生成岩、表生成岩及埋藏成岩等多种成岩环境。这种特有的沉积-成岩演化过程决定了该气田独有的垂向非均质

特征,并造就了 2 个高孔渗段和 3 个低孔渗段间互的储层结构(表 1)。其中,马五₁~马五₃、马五₄^{1a}、马五₅高孔渗段物性较好,溶蚀孔洞缝发育、含气性好,多为 I 类和 II 类储层;马五₂~马五₃、马五₄^{1b}~马五₄^{3b}、马五₅低孔渗段岩性相对致密、物性差,多为致密层。

马五₁~马五₃、马五₄^{1a}由于沉积期含膏云坪、含藻云坪、颗粒滩等有利沉积微相相对发育,形成的云岩质纯、性脆,且含硬石膏结核、盐岩等多种易溶组分,在溶解和破裂作用下可形成大量溶蚀孔、洞、缝空间,在沉积同生期和抬升风化期

有利于溶解作用进行;马五₂~马五₃、马五₄^{1b}~马五₄^{3b}、马五₅主要为泥云坪、膏盐洼地、灰坪等微相沉积的泥质云岩、膏云岩、云膏岩以及泥晶灰岩,由于先天原因(如泥质含量高、石膏含量高、可溶组分少、可塑性强、结构致密等)导致后期地层水侵入困难,溶解作用较弱,压实作用较强,易演变为致密相。因此,马五₁~马五₃、马五₄^{1a}高孔渗段的形成主要受沉积同生期和抬升风化期溶解作用及含膏云坪、含藻云坪、颗粒滩微相控制,而马五₃~马五₄³、马五₄^{1b}~马五₄^{3b}、马五₅低孔渗段的形成主要受泥云坪、膏岩洼地和灰坪微相控制。

5 结论

1) 靖边气田发育陆表海蒸发潮坪沉积相类型,并可细分为潮上泥云坪、膏岩洼地、含膏云坪、潮间含藻云坪、泥云坪、颗粒滩和潮下灰坪7种沉积微相。储层埋藏成岩过程中经历了白云石化、溶解、充填、破裂、交代、压实-压溶、角砾化及重结晶作用8种主要成岩作用。

2) 储层沉积-成岩演化过程划分为沉积同生期、近地表浅埋藏期、抬升风化期和后埋藏期4个时期。其中,沉积同生期、抬升风化期是溶蚀孔洞形成的主要时期,近地表浅埋藏期、后埋藏期是溶蚀孔洞的主要破坏期。

3) 靖边气田特有的沉积-成岩演化模式决定了该气田独有的垂向非均质特征,并造就了2个高孔渗段和3个低孔渗段间互的储层结构。其中,马五₁~马五₃、马五₄^{1a}高孔渗段分

布主要受沉积同生期和抬升风化期岩溶作用及含膏云坪、含藻云坪、颗粒滩微相控制,而马五₂~马五₃、马五₄^{1b}~马五₄^{3b}、马五₅低孔渗段分布主要受泥云坪、膏岩洼地和灰坪微相控制。

参考文献 (References)

- [1] 何自新, 郑聪斌, 王彩丽, 等. 中国海相油气田勘探实例之二鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(2): 37-44.
He Zixin, Zheng Congbin, Wang Caili, et al. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(2): 37-44.
- [2] 刘广峰, 代金友, 何顺利, 等. 鄂尔多斯盆地中部主力气层异常产能贡献微观因素解析[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(1): 15-17.
Liu Guangfeng, Dai Jinyou, He Shunli, et al. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32(1): 15-17.
- [3] 王彩丽, 孙六一, 王宏. 长庆气田马五₁储层裂缝类型及特征[J]. 天然气工业, 1999, 19(4): 8-12.
Wang Caili, Sun Liuyi, Wang Hong. Natural Gas Industry, 1999, 19(4): 8-12.
- [4] 郑秀才, 任玉秀. 鄂尔多斯盆地主力产气层溶蚀孔洞特征[J]. 江汉石油学院学报, 1998, 20(1): 7-12.
Zheng Xiucui, Ren Yuxiu. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1998, 20(1): 7-12.
- [5] 代金友, 曹淑慧, 齐恩广. 靖边气田马五₁₋₅亚段高分辨率层序地层[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(4): 4-8.
Dai Jinyou, Cao Shuhui, Qi Enguang. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(4): 4-8.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“中国石油学会天然气 2010年学术年会”征文

中国石油学会将于2010年9月1日在上海市召开“2010年中国石油学会天然气学术年会”。本届年会的主题是:以科技进步,促进天然气产业又好又快发展,满足经济和社会发展的需要。

征文内容包括:①我国各含油气盆地天然气新增资源潜力与储量评价;②国内外天然气勘探新理论、新技术及应用成果;③我国天然气需求形势、开发生产动态、面临的主要问题与挑战,以及加快发展的战略与举措;④目前天然气开发生产中的重点与关键技术问题:大位移水平井和多分支井等复杂结构钻井、完井前沿技术,异常高温高压气藏、超深气井钻井安全与有效开发,高含硫气藏的安全、优质开发,低渗致密、低丰度气藏开发的配套技术,增产改造提高单井产量、降低开发成本技术,火山岩气藏描述与产能评价,井网与井位设计、开发方式优化等开发技术及政策等,高含二氧化碳的气藏的开发和防腐处理与集输等;⑤海上天然气勘探开采技术及设备技术;⑥天然气安全环保集输、储运与供给技术;⑦LNG生产、储运、接收与供配气技术;⑧城市企业与民用燃气安全环保、科学调配、节约使用中的管理技术与设施;⑨天然气装备制造如何实现产业转型升级以适应天然气产业快速发展。

征文截止时间:2010年6月30日。

联系方式:成都市府青路一段3号中国石油学会天然气专业委员会秘书处(610051) 李庆,电话:028-86011976;电子信箱:liqingcd@163.com。