

川中磨溪地区龙王庙组沉积相与高频层序对储层的控制

任大伟¹, 江 维¹, 高 达^{1,2}, 杜 柳¹, 罗贤富¹

1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 沉积盆地研究中心, 湖北 武汉 430100

摘 要: 利用磨溪地区龙王庙组钻井岩心、薄片和测井资料, 开展了沉积相、高频层序和储层成因研究。识别出潟湖、滩间海、颗粒滩和云坪等 4 种亚相; 将其划分为 2 个四级层序, 各层序又包括 3~5 个五级层序, 四级层序及体系域可良好对比。储层整体孔隙性较好, 储集空间主要包括晶间(溶)孔、溶洞和裂缝, 储集岩类主要为细晶云岩、粉晶云岩和颗粒云岩。沉积相和高频层序明显控制着有利储层的发育: 颗粒滩和云坪是最有利的储集相, 四级层序高位域的孔隙度明显优于海侵域, 在四级和五级层序界面附近发育的早期岩溶对云坪和颗粒滩储层物性改善起到关键作用, 也为埋藏岩溶和表生岩溶改造奠定基础。

关键词: 沉积相; 高频层序; 碳酸盐岩; 龙王庙组; 四川盆地

CONTROL OF SEDIMENTARY FACIES AND HIGH-FREQUENCY SEQUENCES ON THE RESERVOIR OF LONGWANGMIAO FORMATION IN MOXI AREA, CENTRAL SICHUAN BASIN

REN Da-wei¹, JIANG Wei¹, GAO Da^{1,2}, DU Liu¹, LUO Xian-fu¹

1. College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. Sedimentary Basin Research Center, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: Four sedimentary subfacies of lagoon, inter-shoal sea, grain shoal and dolomitic flat of the Longwangmiao Formation in Moxi area, Central Sichuan Basin are identified by study on the sedimentary facies, high-frequency sequences and reservoir genesis base on the drill cores, thin sections and logging data. The Formation can be divided into two fourth-order sequences while each includes three to five fifth-order sequences separately. The porosity of reservoirs is generally good with the main reservoir space as intercrystalline pores, solution caves and fissures, the main reservoir rocks being finely crystalline, silty and grained dolomites. The favorable reservoirs are obviously controlled by sedimentary facies and high-frequency sequences. Grain shoals and dolomitic flats are the most porous reservoir facies. The HST in the fourth-order sequences usually shows better reservoir quality than the TST. Early stage dissolution developed near the fourth and fifth order sequence boundary plays the key role on the porosity improvement of dolomitic flats and grain shoals and also provides basis for the later stage burial dissolution and telogenetic karstification.

Key words: sedimentary facies; high-frequency sequence; carbonate rock; Longwangmiao Formation; Sichuan Basin

收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-06-13. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金“塔中地区晚奥陶世碳酸盐台地边缘沉积演化及其对古构造和海平面变化的响应”(41502104); 长江大学大学生创新创业计划项目“川中地区龙王庙组台内滩沉积特征及主控因素研究”(2016017).

作者简介: 任大伟 (1995—), 男, 长江大学地球科学学院资源勘查工程专业本科生, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路特一号, E-mail//1601020537@qq.com

通信作者: 高达 (1990—), 男, 博士, 副教授, 从事层序地层学和沉积学的教学和研究工作, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路特一号, E-mail//gaoda18@gmail.com

0 引言

川中地区龙王庙组气藏是我国迄今发现的最大的单体整装气藏,其储层类型属于滩相岩溶型白云岩储层^[1-3].颗粒滩主要发育于相对平缓的古地貌之上^[4-5],储层的形成受到白云岩化、早期岩溶、表生岩溶及埋藏溶蚀的共同影响^[1,5-7].不同学者对于主控因素的认识存在争议,有的倾向早期岩溶作用是储层改善的关键^[1],还有认为在颗粒滩叠加的加里东期-海西期的表生岩溶作用更为重要^[7-8].精细的沉积相分析和高精度层序地层研究是阐明碳酸盐岩储层发育机制的重要基础,但关于龙王庙组层序地层的研究较少^[9].本文利用磨溪地区的钻井、岩心和薄片资料,在沉积相精细分析基础上开展高频层序研究,综合探讨二者对有利储层的控制,以期有助于深入理解储层成因机制,预测有利储层的分布.

1 区域地质概况

磨溪地区位于四川盆地中部(图1).寒武纪盆地整体为区域拉张的构造背景^[10],龙王庙期沉积期盆地总体为向东倾斜的隆凹相间的古地貌^[11],形成以白云岩为主的碳酸盐缓坡沉积.研究区龙王庙组从岩性和旋回上可划分为两段:下段主要发育深灰色、灰色块状含泥质的泥晶白云岩和少量颗粒云岩;上段以厚层颗粒云岩、晶粒云岩为主^[9,11].龙王庙组整体构成一个三级层序.储集层为典型的滩相岩溶型储集层,主要分布于两段的中上部^[7-9,12].

2 沉积相特征

2.1 潟湖

潟湖亚相的主要岩性为薄层状泥晶云岩和含泥云岩(图2a、b),测井上具有高钾钍(KTH)和低电阻率(RT)的特征,指示较低的水动力和局限的水循环条件.该亚相主要分布于龙王庙组底部.

2.2 滩间海

滩间海的主要岩性为深灰色粉晶-泥晶白云岩和具菌黏结结构的含颗粒粉晶白云岩(图2c、d),后者在薄片下垫白色打印纸可见黏结状的似球粒(~0.03 mm).测井表现为中KTH和低RT.该亚相发育于颗粒滩间中等水动力环境中.

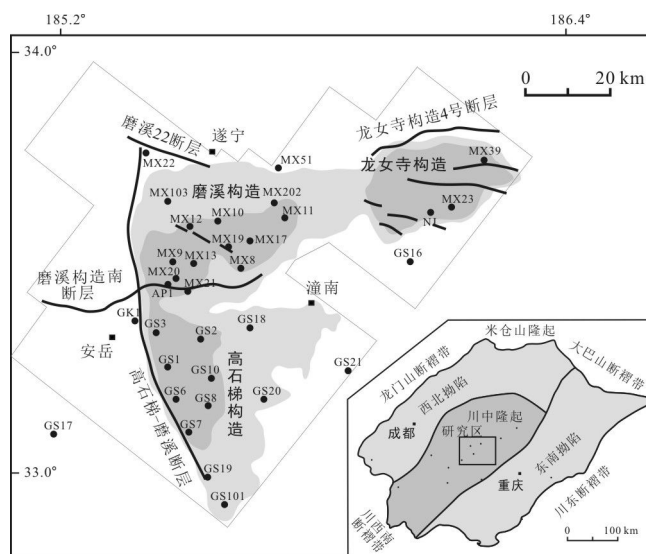


图1 研究区位置及构造纲要图

(据文献[4]修改)

Fig. 1 Location and tectonic outline of the study area

(Modified from Reference [4])

2.3 颗粒滩

颗粒滩亚相主要包括残余砂屑白云岩、鲕粒白云岩和薄层状砾屑白云岩,分别指示砂屑滩、鲕粒滩和砾屑滩微相.残余砂屑云岩具半自形-他形细晶结构(图2e),在薄片下垫白色打印纸可见清晰的砂屑结构(0.1~0.3 mm)(图2f).鲕粒粒径0.3~0.6 mm,分选良好,呈浑圆状,少量可见原始同心圈层(图2g).砾屑白云岩主要由2~8 mm的砾屑构成,分选和磨圆中等-较差.颗粒滩主要发育于波浪和潮汐持续作用的高能环境中.KTH测井曲线多呈低值箱形.

2.4 云坪

云坪亚相以发育浅灰-灰色粉-细晶白云岩为主(图2i),形成于浅水台地向陆的潮坪环境中.岩心上常见明暗相间的“花斑”状(图1h)，“暗斑”区域孔隙更发育.主要分布于龙王庙组的中部和顶部.

3 高频层序特征

根据岩性、相序和电测曲线特征,将龙王庙组划分为2个四级层序,各层序又可分为3~5个五级层序(图3).四级层序和体系域在区域上可良好对比.

3.1 四级层序

SQ1:海侵体系域(TST)以潟湖为主,KTH呈高值锯齿状,反映水体较深.高位体系域(HST)厚度较大,

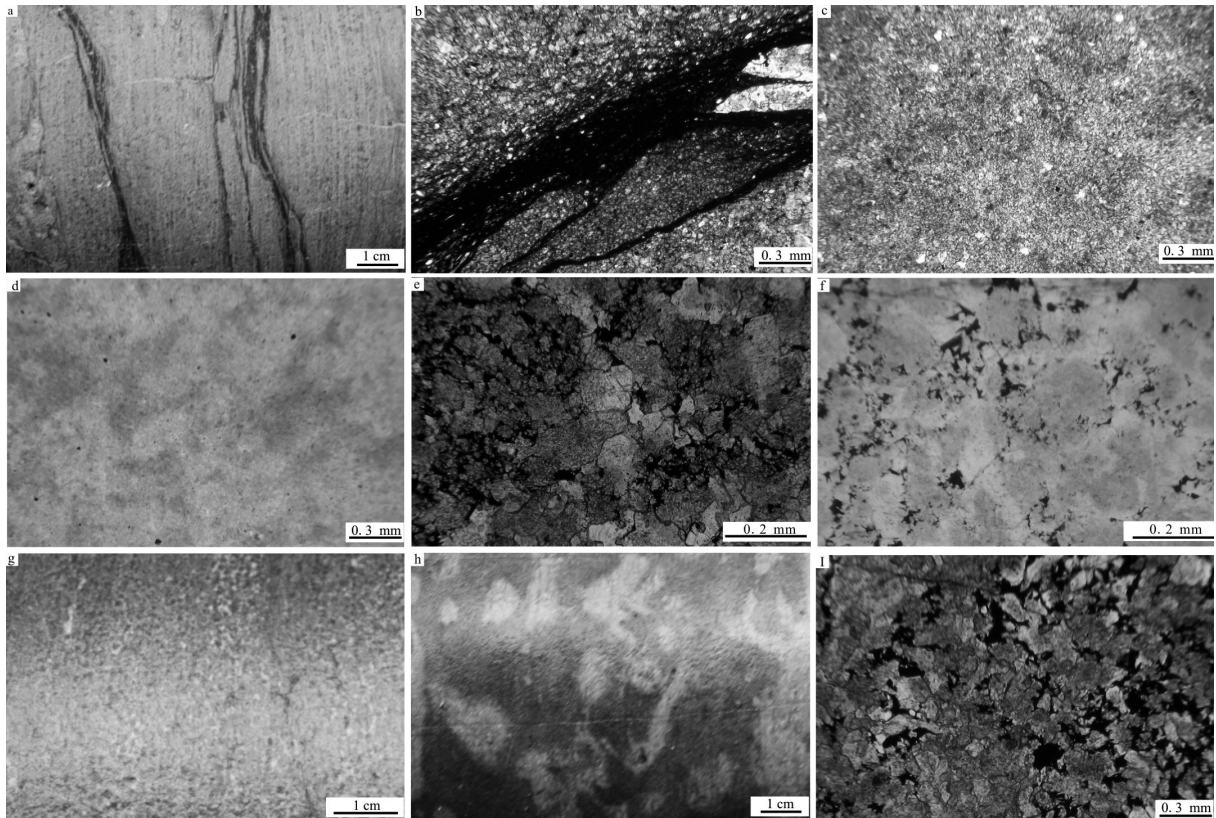


图 2 磨溪地区龙王庙组典型沉积相特征图版

Fig. 2 Characteristics of typical sedimentary facies of the Longwangmiao Formation

a—含泥泥晶云岩, 潟湖亚相, 磨溪 12 井(4681.5 m) (argillaceous micritic dolomite, lagoon, MX12 well); b—含泥泥晶云岩, 潟湖亚相, 磨溪 12 井(4682.1 m) (argillaceous micritic dolomite, lagoon, MX12 well); c—具菌黏结结构的含颗粒粉晶白云岩, 滩间海亚相, 磨溪 12 井(4668.2 m) (grained silty dolomite with binding structure, inter-shoal sea, MX12 well); d—与 c 同视域, 加垫白纸可见清晰的菌黏结结构 (the same area as c, clear binding structure on white paper background); e—残余砂屑云岩的细晶云岩, 颗粒滩亚相, 磨溪 13 井(4597.2 m) (fine-crystalline dolomite with grain shoal, MX13 well); f—与 e 同视域, 加垫白纸可见清晰的砂屑 (the same area as e, clear arenaceous structure on white paper background); g—鲕粒云岩, 颗粒滩亚相, 鲕粒滩微相, 磨溪 21 井(4666.1 m) (oolitic dolomite, grain/oolid shoal, MX21 well); h—细晶云岩, 岩心上呈明暗相间的花斑状, 磨溪 12 井(4641.9 m) (fine crystalline dolomite, bright-dark granophytic structure, MX12 well); i—粉晶白云岩, 云坪亚相, 磨溪 12 井(4634.7 m) (silty dolomite, dolomitic flat, MX12 well)

以发育滩间海和颗粒滩相为主, 顶部少量云坪沉积. KTH 曲线呈漏斗形和平滑箱形, 反映向上变浅的进积序列, HST 的上部构成较好的储层.

SQ2: 层序下部 TST 较薄, 以潟湖和滩间海相为主, KTH 值较大. 层序上部 HST 明显加厚, 发育多套滩间海-颗粒滩-云坪相组合. KTH 曲线以低值箱状为特征, SQ2 的 HST 储层质量整体良好. SQ2 之上为高台组, KTH 曲线由低值箱型突变为钟型.

3.2 五级层序

根据岩性、沉积相和电测曲线变化, 在层序 SQ1 内部划分出 3~4 个五级层序, 在层序 SQ2 内部划分出

3~5 个五级层序. 五级层序底部 KTH 突然增大, 向上部逐渐减小, 指示水体突然加深, 向上逐渐变浅. SQ1 内五级层序的相组合差异明显, 反映明显的进积过程; SQ2 内五级层序相组合较稳定, 表现为加积序列, 但存在高频的海平面波动.

4 沉积相与高频层序对储层的控制

以磨溪 12 井 287 个实测孔渗数据(图 4)为例, 该井龙王庙组孔隙度分布为 0.32%~7.5%(平均 2.33%). 其中孔隙度小于 2%的样品占 57.0%, 孔隙度 2%~6%的占 37.4%; 渗透率分布在 0~1103 μm^2 (平均 15.5 μm^2),

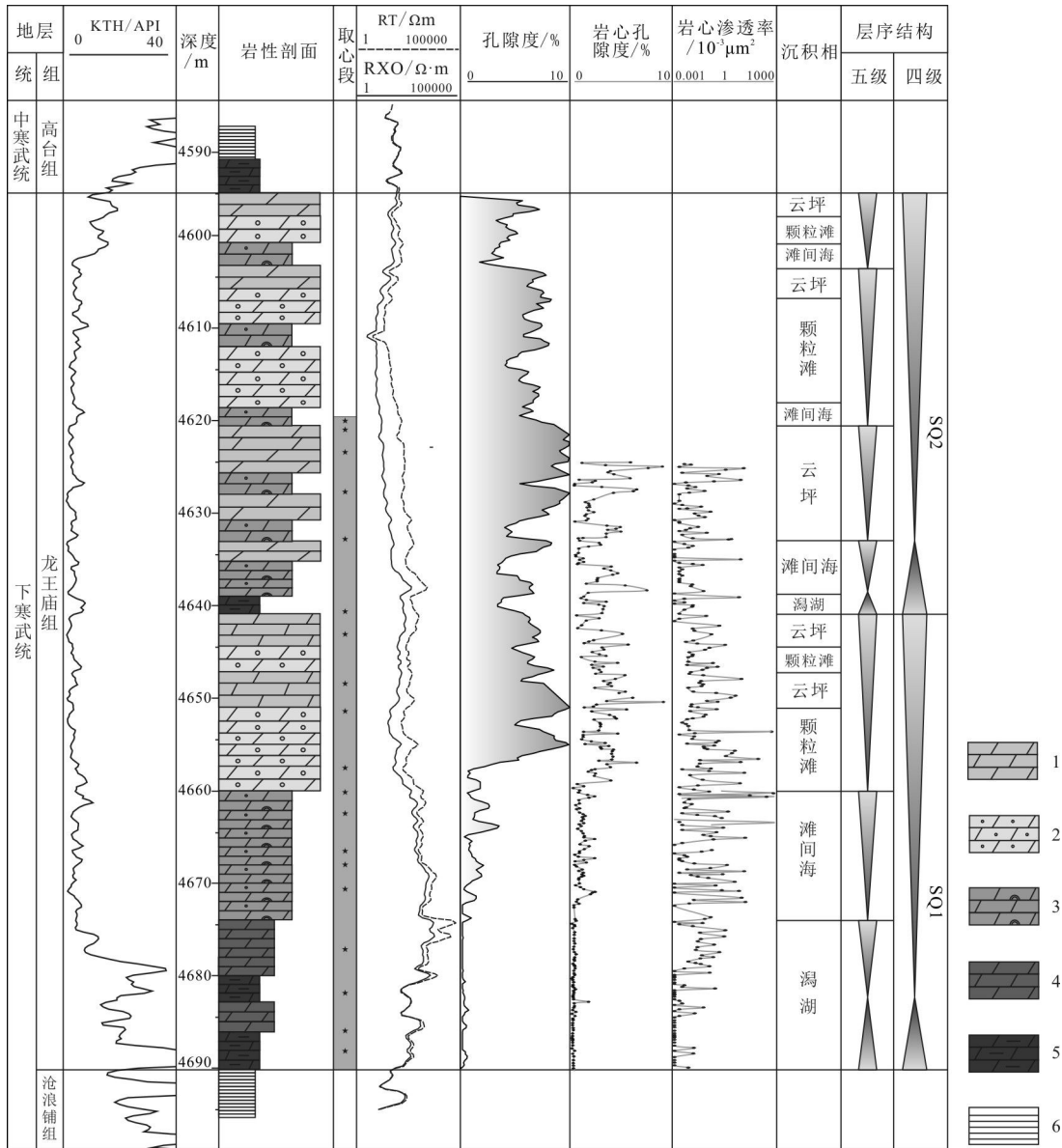


图3 磨溪地区龙王庙组高频层序与沉积相划分及储层分布综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive column of high-frequency sequences, sedimentary facies and reservoir distribution of the Longwangmiao Formation
 1—结晶云岩 (crystalline dolomite); 2—砂屑云岩 (dolarenite); 3—含颗粒的泥-粉晶云岩 (grained micritic-silty dolomite); 4—泥晶云岩 (micritic dolomite); 5—含泥-泥质云岩 (argillaceous dolomite); 6—泥-页岩 (mudstone-shale)

主要分布在 $0.001\sim 0.1\ \mu\text{m}^2$ 之间(71.0%), 大于 $0.1\ \mu\text{m}^2$ 的占 24.5%。表明龙王庙组整体具有较好的孔隙性和较低的渗透性。岩心和薄片观察揭示, 龙王庙组的不同岩石类型中细晶白云岩的物性最好, 其次为残余砂屑结构的粉晶白云岩、颗粒云岩和泥-粉晶白云岩。其储集空间的类型可具体分为晶间孔和晶间溶孔、粒间孔和粒间溶孔、裂缝(包括构造缝和溶蚀缝)、溶洞等。

4.1 沉积相对有利储层的控制

从不同沉积相的孔隙度分布(图5)看出, 龙王庙组云坪和颗粒滩的孔隙性最好(2%~6%为主), 滩间海孔隙性次之, 潟湖的孔隙性最差。云坪沉积在岩心上多呈深灰和浅灰相间的斑状, 其中暗斑的晶间孔和晶间溶孔更为发育, 常见顺层或顺裂缝分布的溶洞; 薄片上观察到大量晶间孔和晶间溶孔。颗粒滩中以鲕粒云岩的孔隙性最好, 岩心上呈浅灰色—灰色, 常发育针状

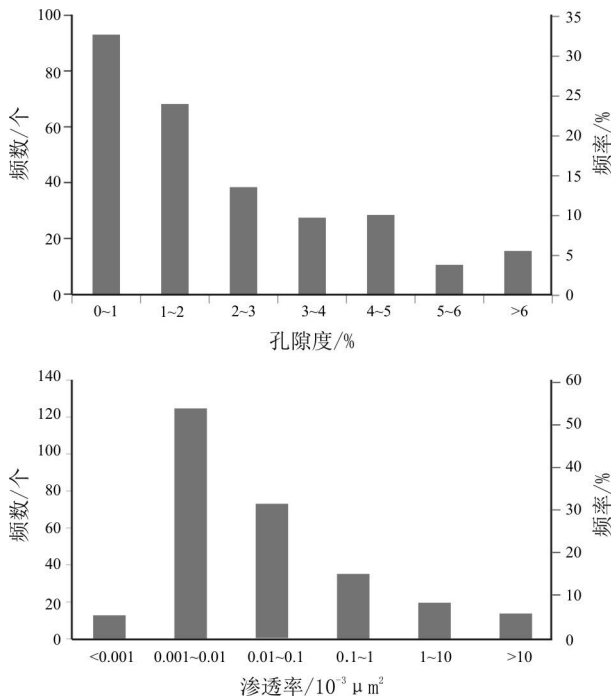


图 4 磨溪地区龙王庙组储层孔隙度与渗透率分布统计图
Fig. 4 Distribution of porosity and permeability of the reservoir in Longwangmiao Formation

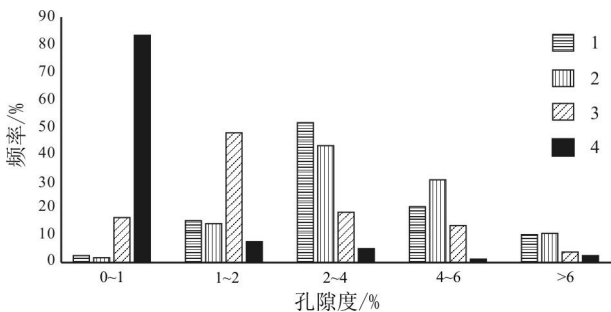


图 5 磨溪地区龙王庙组不同沉积相的孔隙度分布图
Fig. 5 Porosity distribution of different sedimentary facies in the Longwangmiao Formation
1—云坪 (dolomitic flat); 2—颗粒滩 (grain shoal); 3—滩间海 (inter-shoal sea); 4—潟湖 (lagoon)

溶孔和小洞, 镜下观察孔隙主要包括粒间孔、粒间溶孔和晶间孔. 滩间海和潟湖的孔洞发育最差.

大量研究表明, 有利的沉积相是碳酸盐岩储层发育的重要基础^[13-14]. 颗粒滩是四川盆地有利储层的重要类型^[14-15], 结晶云岩类也易构成良好的储层^[6, 16]. 龙王庙组颗粒滩沉积通常具有良好的原始粒间孔, 在早期白云岩化过程中部分粒间孔得以保存, 并且白云岩化作用增强了颗粒云岩的抗压实性, 阻止了孔隙的破

坏. 龙王庙组云坪主要沉积在颗粒滩的顶部, 在早期白云岩化过程中随着白云石晶体的生长, 晶间孔变得更好. 颗粒滩和云坪良好的物性为准同生期、埋藏期及表生期的溶蚀作用^[5, 17]提供了良好基础, 有利于溶孔和溶洞的形成. 最终云坪形成了连通较好的晶间孔、晶间溶孔和溶洞, 颗粒滩则以残余粒间孔、晶间孔等孔隙为主. 垂向上看, 龙王庙组中部和上部是颗粒滩和云坪较发育的部位, 孔隙度通常在 3%~6%之间 (图 3).

4.2 高频层序对有利储层的控制

对比龙王庙组的高频层序及体系域与储层物性分布可以看出, 四级层序 HST 的储层质量明显好于 TST. 在 SQ1 内部, 下部 TST 潟湖亚相整体为非储层; HST 下部仅发育少量孔隙, 向 HST 上部即云坪和颗粒滩孔隙度和渗透率明显变好, 孔隙度主要分布在 4%~7%. 在 SQ1 顶界面之上, 即 SQ2 的 TST 孔隙明显变差, 其 HST 以多套云坪和颗粒滩沉积为主, 整体上具有较好的孔隙性. 其中在 SQ2 的 HST 发育至少 3 个五级层序内部, 测井孔隙度和实测孔隙度均普遍显示出向上变好的趋势.

碳酸盐岩储层的分布易受到不同级别层序的制约^[18], 特别是四级—五级的高频层序与早期岩溶作用密切相关^[19-21]. 龙王庙组四级层序 HST, 相对海平面趋于稳定, 倾向发育颗粒滩和云坪相带, 伴随着沉积水体不断变浅, 在沉积序列的顶部易发育短暂的陆上暴露, 从而发生与四级和五级层序界面相关的早期岩溶, 进一步改善了颗粒滩和云坪的物性.

5 结论

(1) 磨溪地区龙王庙组沉积相划分为潟湖、滩间海、颗粒滩和云坪等 4 种亚相类型. 潟湖亚相可划分为云质潟湖和云泥质潟湖微相, 颗粒滩包括砂屑滩、鲕粒滩和砾屑滩微相.

(2) 磨溪地区龙王庙组可划分为 2 个四级层序, 均由海侵体系域和高位体系域构成. 各四级层序可分为 3~5 个五级层序, 四级层序及体系域在区内井间对比良好.

(3) 磨溪地区龙王庙组储层整体上具有较好的孔隙性和较差的渗透性, 主要的储集空间包括晶间(溶)孔、溶洞和裂缝, 较好的储集岩类包括细晶云岩、粉晶

云岩和颗粒云岩。

(4)有利储层明显受到沉积相和高频层序的制约。颗粒滩和云坪是最有利的储集相,常发育在四级层序高位域上部,在四级和五级层序界面附近易发育早期岩溶作用对云坪和颗粒滩储层物性的改善最为关键,同时为后期的埋藏岩溶和表生岩溶改造奠定基础。

参考文献:

- [1]周进高,徐春春,姚根顺,等.四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J].石油勘探与开发,2015,42(2):158-166.
- [2]邹才能,杜金虎,徐春春,等.四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J].石油勘探与开发,2014,41(3):278-293.
- [3]冯伟明,刘建清,谢渊,等.上扬子区龙王庙期碳酸盐岩台地模式及油气勘探[J].特种油气藏,2015,22(1):61-65.
- [4]魏国齐,杨威,杜金虎,等.四川盆地高石梯-磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J].石油勘探与开发,2015,42(3):257-265.
- [5]刘树根,宋金民,赵异华,等.四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J].成都理工大学学报:自然科学版,2014,41(6):657-670.
- [6]张建勇,罗文军,周进高,等.四川盆地安岳特大型气田下寒武统龙王庙组优质储层形成的主控因素[J].天然气地球科学,2015,26(11):2063-2074.
- [7]金民东,曾伟,谭秀成,等.四川磨溪-高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素[J].石油勘探与开发,2014,41(6):650-660.
- [8]杨雪飞,王兴志,杨跃明,等.川中地区下寒武统龙王庙组白云岩储层成岩作用[J].地质科技情报,2015,34(1):35-41.
- [9]刘冷杉,胡明毅,高达,等.四川磨溪-高石梯地区龙王庙组层序划分及储层预测[J].大庆石油地质与开发,2016,35(5):42-47.
- [10]李皎,何登发.四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造-沉积环境演化[J].古地理学报,2014,16(4):441-460.
- [11]姚根顺,周进高,邹伟宏,等.四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J].海相油气地质,2013,18(4):1-8.
- [12]杨雪飞,王兴志,唐浩,等.四川盆地中部磨溪地区龙王庙组沉积微相研究[J].沉积学报,2015,33(5):972-982.
- [13]罗平,张静,刘伟,等.中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J].地学前缘,2008,15(1):36-50.
- [14]赵文智,沈安江,胡素云,等.中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J].石油勘探与开发,2012,39(1):1-12.
- [15]洪海涛,杨雨,刘鑫,等.四川盆地海相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J].石油学报,2012,33(z2):64-73.
- [16]黄思静,胡作维,王春梅,等.四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩成岩作用和白云岩成因的研究现状和存在问题[J].地球科学进展,2007,22(5):495-503.
- [17]代林呈,王兴志,杜双宇,等.四川盆地中部龙王庙组滩相储层特征及形成机制[J].海相油气地质,2016,21(1):19-28.
- [18]于炳松,樊太亮,黄文辉,等.层序地层格架中岩溶储层发育的预测模型[J].石油学报,2007,28(4):41-45.
- [19]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.
- [20]高达,林畅松,胡明毅,等.利用自然伽马能谱测井识别碳酸盐岩高频层序——以塔里木盆地塔中地区 T1 井良里塔格组为例[J].沉积学报,2016,34(4):707-715.
- [21]高达,林畅松,杨海军,等.塔中地区良里塔格组沉积微相及其对有利储层的控制[J].地球科学——中国地质大学学报,2013,38(4):819-831.