

川西气田雷四上亚段白云岩储层特征 及发育主控因素

高恒逸,王勇飞,邓美洲,王琮仙,李勇,陈丽花

中石化西南油气分公司勘探开发研究院

摘要 以前期区域构造和沉积演化成果为基础,充分利用岩心、薄片、扫描电镜、阴极发光及测井曲线等基础资料,分析了川西气田雷四上亚段潮坪相薄互层白云岩储层岩石学、储集空间类型及物性特征,建立了研究区潮坪相完整沉积旋回垂向分布模式,深入探讨了储层发育控制因素。结果表明:川西气田雷四上亚段有利储层岩性主要为藻纹层白云岩、藻粘结白云岩、藻砂屑白云岩和晶粒白云岩等岩石类型,储集空间以藻格架溶孔、晶间(溶)孔、粒间孔为主,储层总体具有低孔、低渗特征。潮间带藻云坪、砂屑滩和云坪微相是优质储层发育的物质基础,准同生期和表生期溶蚀作用是控制雷四上亚段大量溶蚀孔洞发育的关键,古今构造高部位为前期孔隙保存提供了有利条件。

关键词 白云岩;潮坪相;沉积旋回;溶蚀作用;雷口坡组;川西气田

中图分类号:TE122.2³ 文献标识码:A

0 前言

四川盆地川西坳陷中三叠统雷口坡组四段(简称雷四段)白云岩分布广泛,是油气勘探开发的重要目的层。近年来,在新场—孝泉—合兴场隆起带和龙门山前带,雷四段天然气勘探评价相继取得了新的突破和重要进展,彭州地区多口钻井均获得了中—高产油气流,展示了川西气田雷四段气藏巨大的勘探开发潜力,雷四段白云岩储层特征及控制因素也逐渐成为了川西坳陷碳酸盐岩气藏勘探开发研究的热点和重点^[1-7]。前人研究认为雷口坡组储层的形成主要与表生溶蚀和埋藏溶蚀有关^[1-3]。川西气田构造低部位的评价井证实了区域上储层分布广泛,但纵横向非均质性强,薄互层叠置复杂,实际储层分布情况与前期认识存在矛盾。为进一步明确优质储层分布,指导井位及靶点设计,实现气田高效开发,本文以川西气田主产气层雷口坡组四段上亚段(简称雷四上亚段)为研究对象,利用5口井的岩石薄片、扫描电镜、阴极发光、元素录井和测井曲线等资料对雷四上亚段储层特征及发育控制因素进行研究,建立优质储层分布模式,为潮坪相薄互层白云岩储层的精细预测提供地质依据。

1 地质背景

川西气田处于四川省成都市彭州、都江堰境内(图1a),东南距成都市约45 km,构造位置处于龙门山大型构造带中段前缘的石羊场—金马—鸭子河构造带上,东南部紧邻成都凹陷。石羊场—金马—鸭子河构造带整体为一受关口断裂和彭县断裂夹持的断背斜,南缓北陡,总体上呈北东走向^[4]。中晚三叠世,川西地区由于西侧康滇古陆和龙门山—九顶山古岛链的存在,阻滞了川西湖盆与松潘外海沟通,同时由于局部区域构造升降运动频繁,干旱与潮湿气候交替出现,导致海盆水体的进退及含盐浓度、温度等沉积条件发生周期性变化,雷口坡组形成多套以白云岩—硬石膏岩为主的蒸发岩沉积组合旋回^[5]。拉丁期末(天井山期),印支早期运动使地台整体隆升,海水退出上扬子台地,川西地区天井山组基本剥蚀殆尽,仅残存于大园包、江油马角坝、绵竹汉旺一带,雷口坡组顶部也普遍受到剥蚀^[6],雷四段由西向东有逐渐变薄的趋势。研究区雷四段自上而下分为上、中、下3个亚段,其中上亚段为主要产气层段,地层厚度约为130~140 m(图1b),主要为潮坪相沉积,发育藻云坪、云坪、灰云坪及灰坪等沉积微相。

收稿日期:2021-01-26;改回日期:2021-05-28

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”的子课题“海相碳酸盐岩地震勘探关键技术”之专题“川西山前带潮坪相白云岩储层地震预测应用研究”(项目编号:2017ZX05005-004-010)资助

第一作者:高恒逸,硕士研究生,高级工程师,主要从事储层地质研究。通信地址:610081四川省成都市高新区吉泰路688号;E-mail:464122081@qq.com

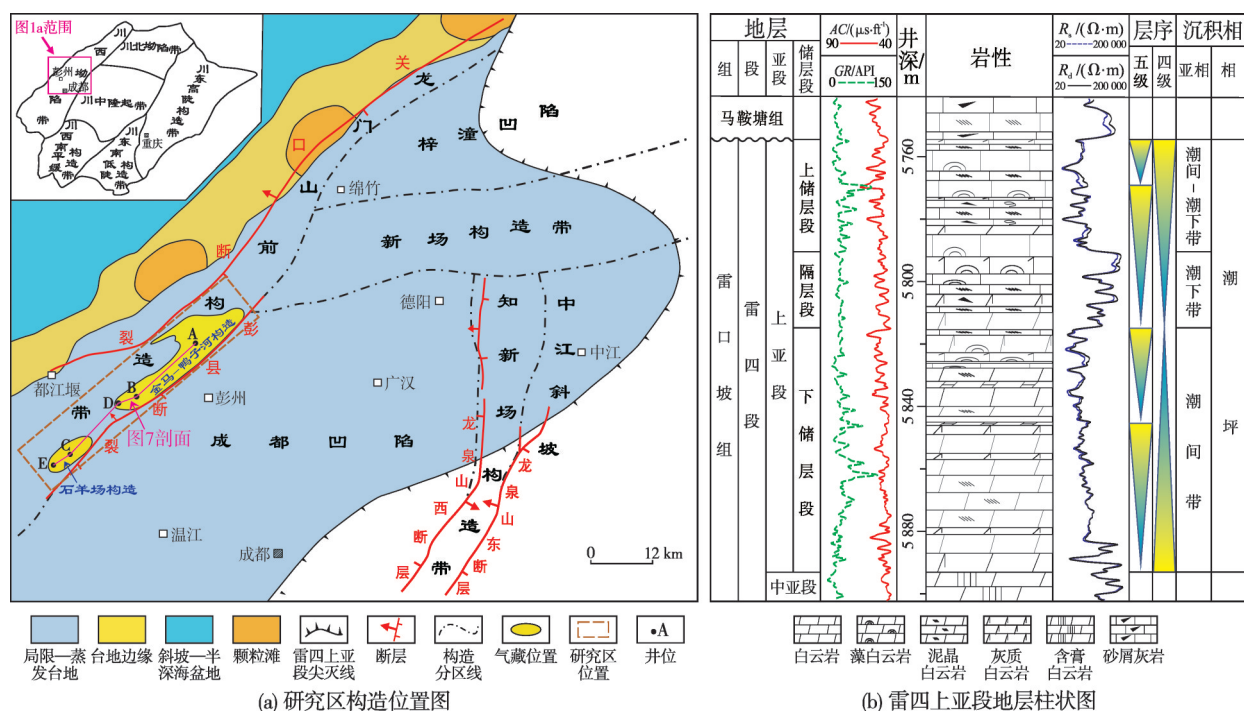


图1 研究区构造位置与川西气田雷四段上亚段地层综合柱状图
Fig. 1 Tectonic location map of the study area and comprehensive stratigraphic column of Upper Submember of Leikoupo Member 4 in West Sichuan Gas Field

2 储层特征

2.1 岩石学特征

川西气田雷四上亚段岩石类型复杂多样,可分为白云岩类、石灰岩类和过渡岩类。白云岩类主要包括藻纹层白云岩(图2a)、藻粘结白云岩(图2b)、藻砂屑或藻团块白云岩(图2c)、晶粒白云岩(图2d)等有利于储层发育的岩性,以及不利于储层发育的(藻)泥晶白云岩(图2e);石灰岩类主要包括泥灰岩和藻砂屑灰岩等(图2f),储层不发育,镜下未观察到明显的储集空间;过渡岩类包括含灰白云岩、灰质白云岩(图2g)、含云灰岩和白云质灰岩。

2.2 储集空间类型

研究区雷四上亚段白云岩储层储集空间类型复杂、多样,储层主要发育藻格架孔、粒间孔、晶间(溶)孔,其次发育少量溶洞、微裂缝和铸模孔等^[4]。藻格架孔是主要的储集空间类型(图2a, 2b),主要分布在藻纹层白云岩和(残余)藻粘结白云岩中;孔隙形状一般不规则,孔隙直径变化范围较大,从0.01 mm到1 mm均有发育,内部常见白云石、方解石等矿物充填;藻格架孔常见顺层或均匀分布,连

通性好。粒间(溶)孔主要分布在藻砂屑白云岩、藻团块白云岩中(图2c),以原生孔为主,后期部分被充填或半充填,连通性较好。晶间(溶)孔是研究区主要孔隙类型之一,主要分布在泥—粉晶白云岩和残余藻结构白云岩中;孔隙直径介于0.05~0.4 mm,分布不均,孔隙形态不规则状,且大小悬殊(图2d)。

溶洞在研究区局部较发育,主要分布在藻粘结白云岩内,孔洞直径为2~15 mm左右,分布不均匀,部分空间被白云石、石英等矿物充填(图2h);在扫描电镜下,孔喉间见沥青和硫磺充填,溶洞整体来看连通性不好。微裂缝、溶缝的发育(图2e)改善了储层储集性能。研究表明,研究区至少发育3期裂缝,早期裂缝被充填或半充填,后期裂缝大部分保留,部分被扩溶。砂屑灰岩中偶见粒内溶孔(铸模孔),部分被充填、半充填,连通性不好。

2.3 储层物性特征

5口井361块样品的实测物性数据统计表明:川西气田雷四上亚段储层孔隙度为2.00%~23.70%,平均为5.47%;渗透率为 $(0.001 \sim 186) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $5.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占39.5%。根据研究区储层特征及行业规范标准,将储

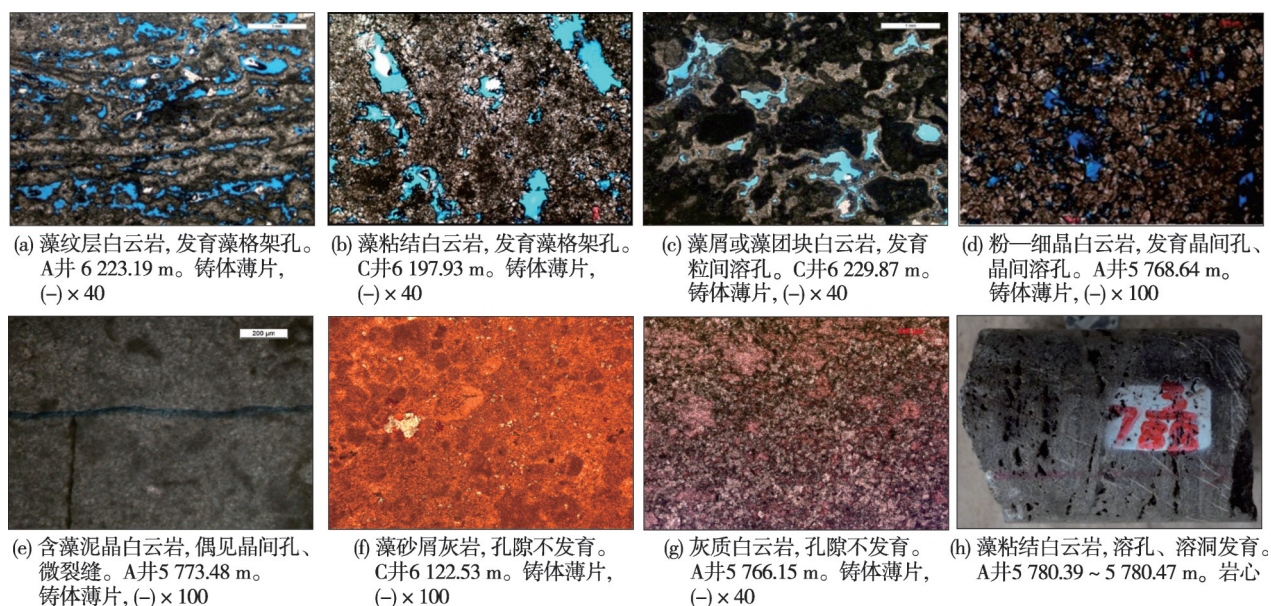


图2 川西气田雷四上亚段储层主要岩石类型及储集空间类型

Fig. 2 Main rock types and reservoir space types of Upper Submember of Leikoupo Member 4 in West Sichuan Gas Field

层划分为Ⅰ类($\phi \geq 10\%$)、Ⅱ类($10\% > \phi \geq 5\%$)、Ⅲ类($5\% > \phi \geq 2\%$)储层。统计表明Ⅰ类储层占比为60.4%, Ⅱ类储层占比为28.3%, Ⅲ类储层占比为11.4%(图3a)。根据孔隙度与渗透率的相关性分析(图3b), 研究区雷四上亚段样品点可分为2个区域: ①A区, 呈现较好的线性相关性, 说明该区域储层类

型以孔隙型为主; ②B区, 呈现低孔高渗的特征, 反映该区域样品裂缝相对较发育, 储层类型以裂缝—孔隙型为主。综上所述, 研究区雷四上亚段白云岩储层物性受溶孔、溶洞等影响较大, 局部裂缝发育, 储层类型以孔隙型为主, 裂缝—孔隙型次之。储层物性总体上具有低孔、低渗特征。

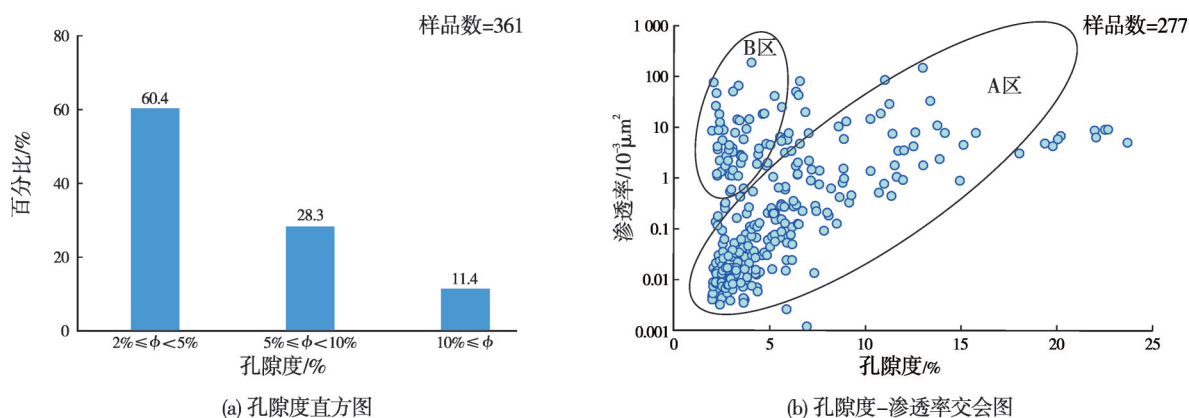


图3 川西气田雷四上亚段储层孔隙度直方图和孔隙度—渗透率交会图

Fig. 3 Porosity histogram and porosity-permeability crossplot of Upper Submember of Leikoupo Member 4 in West Sichuan Gas Field

3 优质储层控制因素

川西气田雷四上亚段白云岩储层非均质强, 综合沉积、成岩、构造演化等因素分析表明, 优质储层发育和分布主要受沉积高频旋回、溶蚀作用和古今构造等3个因素控制。

3.1 潮间带高频旋回中—上部微相是优质储层发育的基础

雷四段沉积晚期, 川西坳陷为带有台地边缘的局限台地—蒸发台地沉积体系, 由西向东依次为障壁台缘、潟湖和潮坪等^[7]。研究区主要发育潮坪相,

灰云坪、云灰坪位于六级旋回下部,主要以含灰白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩为主,这些岩石的孔隙不发育,后期重结晶、溶蚀作用对其改造弱,储层发育较差。已钻井样品物性统计显示:孔隙度为0.07%~7.39%,平均为2.14%;渗透率为 $(0.000\ 7\sim 18.2)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均为 $0.55\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。

3.2 溶蚀作用是优质储层形成的关键因素

根据溶蚀作用形成的机理、先后顺序及其与储集空间的关系等,可将发生在雷四上亚段中的溶蚀作用分为准同生期溶蚀、表生期岩溶和埋藏期溶蚀3大类。

3.2.1 准同生期溶蚀控制优质储层的形成与发育

准同生期溶蚀发生在准同生—早成岩阶段。由

于海平面周期性升降变化,位于潮间带亚相的相对高部位的藻云坪、藻砂屑滩和云坪容易频繁暴露出水面之上,遭受大气淡水的淋滤(次要流体还有大气水和海水混合水,甚至海水),造成文石、高镁方解石等不稳定矿物组分被溶解,使得藻粘结格架孔、粒内溶孔、粒间溶孔和铸模孔等比较发育^[10]。在岩心上可见侵蚀面(图6a)和顺层溶孔(图6b)等准同生期暴露溶蚀的典型特征^[11]。由于准同生溶蚀孔隙形成时间早,后期部分被方解石、白云石等矿物充填或半充填(图6c,6d)。薄片常见的等厚环边和胶结物与基质阴极发光一致(图6e,6f)等标志表明准同生期形成的孔隙在早期发生了胶结作用^[12]。后期孔隙保存较好、胶结物含量少的层段可以发育物性好的储层。

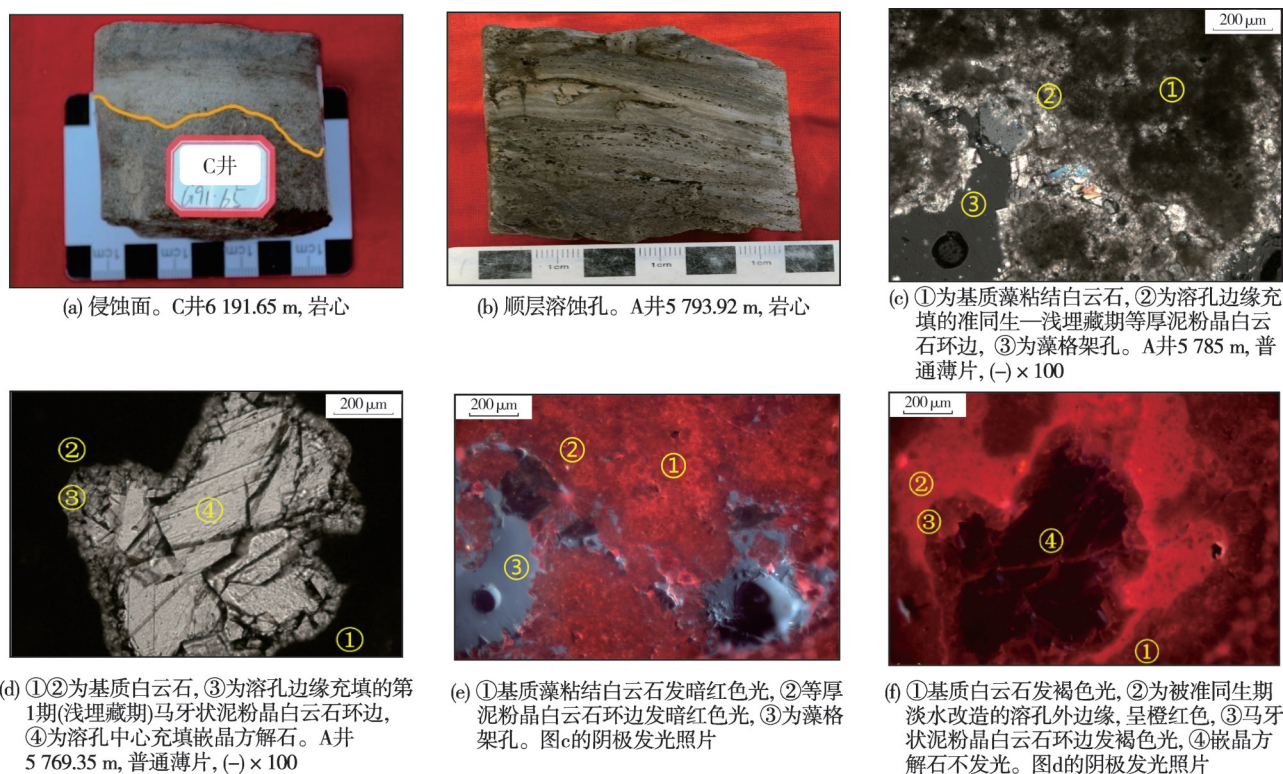


图6 川西气田雷四上亚段准同生期溶蚀及早期胶结标志

Fig. 6 Signs of penecontemporaneous dissolution and early cementation of Upper Submember of Leikoupo Member 4 in West Sichuan Gas Field

3.2.2 表生期溶蚀对优质储层改造作用明显

表生溶蚀作用往往发生在表生成岩阶段。由于构造抬升使已固结的高度胶结的碳酸盐岩进入近地表环境,并遭受大气水的溶蚀作用,表生溶蚀作用一般发生在不整合面以下垂向距离数米至上百米范围内^[13]。研究区雷口坡组顶部由于受到中

三叠世末期印支运动的影响,局部地区后期重新暴露于地表,遭受剥蚀及大气水的淋滤,造成石膏、方解石等相对易溶的矿物被溶解,形成了溶孔、溶洞和溶缝等,储层进一步被改造。通过测井储层评价研究,对E井—C井—D井—B井—A井进行连井对比分析(图7),结果表明:研究区优质储层主要分布在距离雷口坡组顶部不整合面下100 m以内,100 m

约 4 000 ~ 7 000 m。埋藏期溶蚀作用对研究区雷四段储层改造作用较弱,溶蚀标志不明显,仅在局部偶见埋藏溶蚀孔、沥青或六方柱状石英等热液矿物充填。

3.3 古今构造高部位有利于前期孔隙的保存

石羊场—金马—鸭子河正向构造带自印支晚期已具备雏形,燕山期进一步发展,于喜马拉雅期定型。从构造演化特征及形态看,从印支晚期至今该构造的高部位基本一致。川西雷口坡组内部烃源岩在须家河组三段沉积末期进入生烃门限,在须家河组五段沉积末期进入成熟阶段,早侏罗世末到现今达到过成熟阶段。从构造和生排烃演化史看^[15-16],石羊场—金马—鸭子河构造带的形成早于生排烃高峰期,因此构造高部位长期处于油气聚集的指向区。油气充注后,能有效抑制规模胶结物的形成,较好地保存了早期孔隙。构造低部位的储层在埋藏期胶结作用相对较强,孔隙中常见细—粗晶

白云石和嵌晶方解石等胶结充填。A井、B井和C井分别位于鸭子河构造和石羊场构造的相对高部位,这3口钻井测试均获中—高产天然气流,测井解释储层厚度为 68.2 ~ 69.7 m (图 7),测井孔隙度为 4.45% ~ 6.35%,平均为 5.44%。D井、E井构造位置较低,测试未获天然气,测井解释储层厚度为 43.8 ~ 46.4 m,测井孔隙度为 4.48% ~ 4.85%,平均为 4.67%。

4 储层分布模式

以 5 口已钻井实钻资料为基础,综合沉积、构造及储层发育主控因素等认识,初步建立了雷四上亚段储层发育分布模式(图 9)。整体上看川西气田储层分布广泛但非均质强,I类、II类、III类储层相互叠置分布。纵向上,受沉积高频旋回和表生溶蚀控制,I、II类储层主要集中分布在雷四上亚段中、上部,下部相对欠发育。平面上,受古今构造高部位控制,优质储层主要分布在金马、鸭子河构造高部位,石羊场次之,构造低部位储层欠发育。

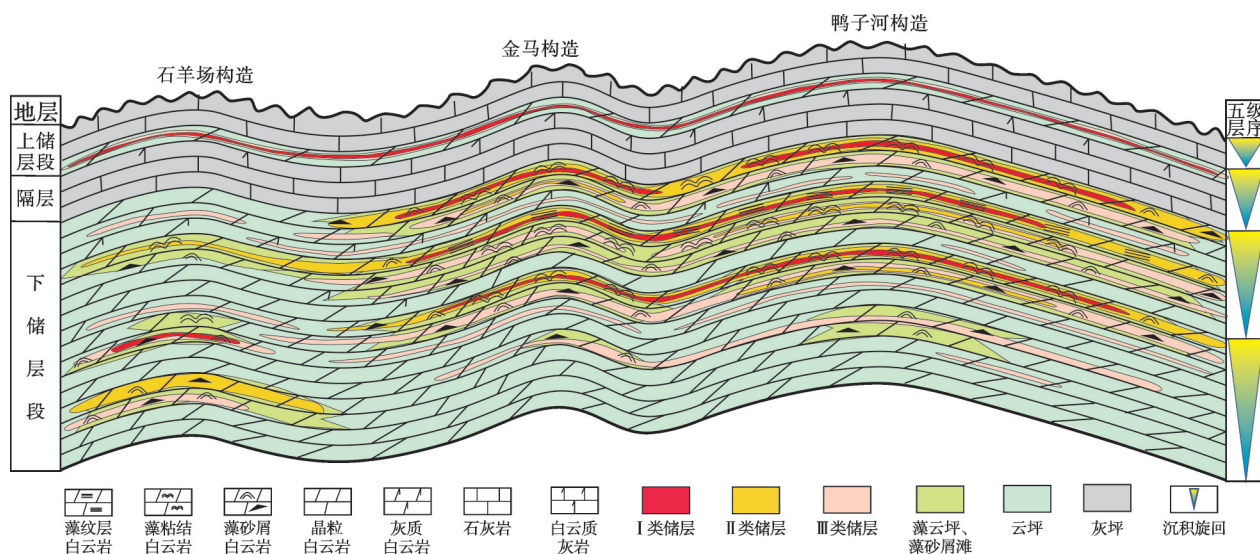


图 9 川西气田雷四上亚段储层分布模式图

Fig. 9 Reservoir distribution pattern of Upper Submember of Leikoupo Member 4 in West Sichuan Gas Field

5 结 论

(1) 川西气田雷口坡组四段上亚段有利储层主要发育在藻纹层白云岩、藻粘结白云岩、藻砂屑白云岩和泥—粉晶白云岩内,储集空间类型以藻格架孔、晶间(溶)孔、粒间孔为主,储层总体具有低孔、低渗特征。

(2) 川西气田雷口坡组四段上亚段白云岩储层非均质强,主要受沉积高频旋回、溶蚀作用和古今

构造等 3 个因素控制:位于六级沉积旋回高部位的藻云坪、砂屑滩和云坪微相是优质储层发育的物质基础;准同生期溶蚀作用是储层发育的关键,表生期溶蚀作用对储层产生进一步的改善作用,埋藏溶蚀作用影响较弱;古今构造相对高部位为前期孔隙的保存提供了有利条件。

(3) 纵向上,受沉积高频旋回和表生溶蚀控制,I类、II类储层主要集中分布在雷四上亚段中、上

部;平面上,受古今构造高部位控制,优质储层主要分布在石羊场—金马—鸭子河构造高部位。

参考文献

- [1] 孟昱璋,徐国盛,刘勇,等.川西雷口坡组古风化壳喀斯特气藏成藏条件[J].成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(1):70-79.
- [2] 唐宇.川西地区雷口坡组沉积与其顶部风化壳储层特征[J].石油与天然气地质,2013,34(1):42-47.
- [3] 王鑫,辛勇光,田瀚,等.四川盆地中三叠统雷口坡组沉积储层研究进展[J].海相油气地质,2020,25(3):210-222.
- [4] 高恒逸,邓美洲,李勇,等.川西彭州地区中三叠统雷口坡组四段储层特征及成岩作用[J].海相油气地质,2018,23(1):37-46.
- [5] 隆轲,李蓉,王琼仙,等.川西坳陷雷四³亚段沉积微相特征及对储层的影响[J].地球科学前沿,2018,8(3):538-545.
- [6] 张劲超,赵晨露,杜浩坤,等.川西雷口坡组滩体沉积相研究[J].长江大学学报(自然科学版),2013,10(10):4-6.
- [7] 李宏涛,胡向阳,史云清,等.四川盆地川西坳陷龙门山前雷口坡组四段气藏层序划分及储层发育控制因素[J].石油与天然气地质,2017,38(4):753-763.
- [8] SCHOLLE P A, BEBOUT D G, MOORE C H. 碳酸盐岩沉积环境[M]. 胡素云,汪泽成,徐兆辉,等译.北京:石油工业出版社,2015:92-113.
- [9] 李凌,谭秀成,周素彦,等.四川盆地雷口坡组层序岩相古地理[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4):13-22.
- [10] 王良军.川北地区灯影组四段优质储层特征及控制因素[J].岩性油气藏,2019,31(2):35-45.
- [11] 陈娅娜,沈安江,潘立银,等.微生物白云岩储集层特征、成因和分布:以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J].石油勘探与开发,2017,44(5):704-715.
- [12] 王琼仙,宋晓波,陈洪德,等.龙门山前雷口坡组四段白云岩储层胶结物对早期孔隙的影响[J].石油实验地质,2018,40(6):757-763.
- [13] 何登发.不整合面的结构与油气聚集[J].石油勘探与开发,2007,34(2):142-149,201.
- [14] 万云,刘存革,刘洪,等.塔河油田奥陶系多期岩溶作用的识别标志[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(5):6-11.
- [15] 李书兵,许国明,宋晓波.川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J].中国石油勘探,2016,21(3):74-82.
- [16] 杨克明.四川盆地西部中三叠统雷口坡组烃源岩生烃潜力分析[J].石油实验地质,2016,38(3):366-374.

编辑:黄革萍

Characteristics and main controlling factors of dolomite reservoir of Upper Submember of Leikoupo Member 4 in West Sichuan Gas Field

GAO Hengyi, WANG Yongfei, DENG Meizhou, WANG Qiongxiang,
LI Yong, CHEN Lihua

Abstract: Based on the understanding of regional structure and sedimentary evolution in the early stage, and making full use of the basic data such as core, thin section, physical properties, scanning electron microscope, cathodoluminescence and logging curves, the petrology, reservoir space type and physical properties of the thin interbedded dolomite reservoir of tidal flat facies of Upper Submember of Leikoupo Member 4 in West Sichuan Gas Field are analyzed, and the vertical distribution model of complete sedimentary cycle of tidal flat facies in the study area is established, and the controlling factors of reservoir development are deeply discussed. It is shown that favorable reservoirs are mainly developed in algal laminar dolomite, algal bonded dolomite, algal arenaceous dolomite and crystalline dolomite. The reservoir space is mainly algal framework solution pore, intercrystalline (solution) pore and intergranular pore. The reservoir has the characteristics of low porosity and low permeability. The microfacies of algae dolomite flat, arenaceous shoal and dolomite flat in the intertidal zone are the material basis for the development of high-quality reservoirs. The penecontemporaneous dissolution and the supergene dissolution are the key to control the development of a large number of dissolution holes in Upper Submember of Leikoupo Member 4. The high parts of ancient and modern structures provide favorable conditions for early pore preservation.

Key words: dolomite; tidal flat facies; sedimentary cycle; dissolution; Leikoupo Formation; West Sichuan Gas Field

GAO Hengyi, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in research on reservoir geology. Add: No.688 Jitai Rd., Gaixin District, Chengdu, Sichuan 610081, China