DOI:10.3969/j.issn.1672-9854.2022.02.006 文章编号:1672-9854(2022)-02-0167-08

川西气田雷口坡组潮坪相白云岩准同生溶蚀特征及对优质储层分布的影响

王琼仙,宋晓波,邓美洲,张 岩,高恒逸,陈丽花,李 勇
中国石化西南油气分公司勘探开发研究院

摘 要 四川盆地西部川西气田的中三叠统雷口坡组四段潮坪相白云岩储层以发育大量组构选择性溶蚀孔隙为特征,储层在平面上大面积分布,但优质储层具有纵向薄、横向非连续分布的特征,空间分布规律不清,直接影响了川西气田大斜度水平井的部署。通过岩心和薄片观察岩石结构构造、储层孔隙特征,同时利用岩石碳氧同位素和阴极发光测试资料,结合潮坪相高频沉积旋回垂向序列特征分析,对川西气田雷四段潮坪相白云岩储层的准同生溶蚀特征、溶蚀强度的控制因素以及准同生溶蚀对优质储层分布的影响进行研究。结果表明:①以渗流豆粒、钙结壳层及层状分布的窗格孔发育为主要特征的准同生溶蚀作用,是雷口坡组优质储层分布的关键控制因素。②受潮坪环境频繁的海平面变化形成的高频沉积旋回控制,准同生溶蚀作用具有单期暴露溶蚀时间短、面积大及多期叠加暴露溶蚀的特征。准同生溶蚀强度受沉积旋回垂向序列特征和单个沉积旋回厚度共同控制。③川西气田主要发育4种类型的沉积旋回,其中潮间上部—潮上带形成的高频沉积旋回最有利于准同生溶蚀作用发生。单个沉积旋回自下而上距离暴露面越近,孔隙越发育,碳氧同位素组成值略变低,测井*GR*值变高、深浅电阻率变低。单个旋回的中上部准同生溶蚀作用最强,容易形成优质储层;单个旋回厚度小于5 m时,优质储层在纵向上发育比较集中,横向上分布比较连续。

关键词 潮坪相;白云岩;高频沉积旋回;准同生溶蚀;优质储层;雷口坡组;川西气田
中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

0 前 言

川西气田位于四川盆地西部龙门山前,中三叠统雷口坡组四段(简称雷四段)发育一套潮坪相白云岩溶蚀孔隙型储层,目前已提交控制储量一千多亿方[1],显示了潮坪相储层的巨大潜力。前人[2-6]从储层孔隙特征、溶蚀作用、储层成因等方面开展过相关研究,但观点不尽相同。部分学者认为雷口坡组储层总体具有相控特征,高频层序控制的潮间带有利沉积微相是储层空间展布与储层发育的关键控制因素[4-5];另有观点认为雷口坡组优质储层的形成与微生物礁滩(微生物席)相关[6]。针对形成储集空间的关键溶蚀作用,一些学者认为印支期古表生大气淡水溶蚀是储层形成的关键作用[7-9];也有学者认为研究区处于印支期古表生岩溶洼陷区—岩溶下斜坡区,岩溶作用有限,且形成的孔隙在埋藏期多被充填胶结,储层储集空间的形成与埋藏期的溶蚀改造作用密切相关[10]。随着研究的不断深入,主流观点认为高频海平面波动控制下的准同生溶蚀是雷口坡组优质储层形成的关键溶蚀作用[11-13]。然而,以往对准同生溶蚀作用机理的研究多涉及台缘、台内礁滩相储层[14-15],对于潮坪相储层来说,准同生期溶蚀存在暴露时间较短、难以形成规模性储层的传统认识[16]。近年来,随着开放体系的暴露溶蚀可能是深层—超深层碳酸盐岩储层形成的主要原因这一认识的提出[17-19],尤其是早成岩期相控岩溶理论的日趋完善,初步提示了早期溶蚀储层可以长期保持并形成深埋优质储层[20]。基于上述认识,本文主要利用川西气田5口井的800余件薄片、铸体、阴极发光和岩石碳氧同位素资料,深入分析了准同生溶蚀作用形成雷口坡组优质储层的机理。研究成果可以更好地揭示这类白云岩储层的宏观分布规律,指导优质储层预测,为开发钻井部署提供依据。

1 沉积特征

中三叠世雷四期,川西气田处于较平坦的地表

收稿日期:2021-05-07;改回日期:2021-12-03
本文受国家科技重大专项所属专题"川西山前带潮坪相白云岩储层地震预测应用研究"(编号:2017ZX05005-004-010)资助
第一作者:王琼仙,硕士,高级工程师,现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:158508571@qq.com

海局限台地潮坪环境(图1)。由于水体较浅,海平面的升降变化往往会在相对平坦的潮坪环境内引起大幅度的相带迁移,造成潮上带、潮间带、潮下带频繁交互[5]。雷口坡组四段上亚段(简称雷四上亚段)中下部为以潮间带沉积为主的白云岩,上部为以潮下带沉积为主的石灰岩夹潮间带—潮上带白云岩(图2),其中白云岩结构较为复杂,晶粒结构、藻纹层结构、藻砂屑藻凝块结构、藻粘结结构等均较发育。

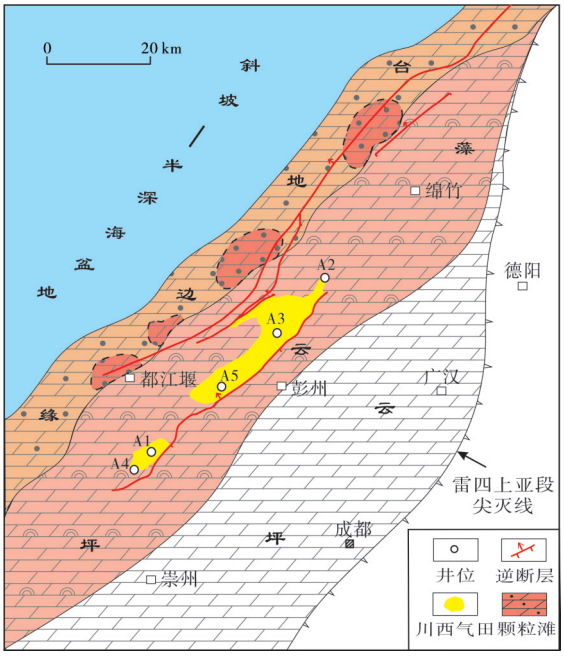


图1 川西地区雷口坡组四段上亚段沉积相平面图

Fig. 1 Sedimentary facies plan of upper submember of the Leikoupo Member 4 in Western Sichuan Basin

受海平面升降变化影响,沉积岩受到大气淡水多期次的改造,甚至直接出露于海平面接受溶蚀,尤其是研究区处于整体低缓的地貌背景,更可能大面积遭受大气淡水淋滤,从而形成大面积分布的有利储层。潮坪特有的沉积成岩环境孕育了雷四上亚段的白云岩储层:中下部的白云岩段(下储层段),储层普遍发育,累计厚度平均为50 m左右;上部石灰岩段(上储层段)中的白云岩夹层,储层也较发育,厚度约为10~15 m(图2)。储层岩性主要为藻砂屑藻凝块白云岩、藻纹层白云岩、泥粉晶白云岩和含灰质白云岩;储集空间以大量早期孔隙如晶间孔、晶间溶孔、窗格孔、藻(粒)间溶孔为主。虽然白云岩中储层普遍发育,但优质储层(岩心和测井孔隙度均大于5%的Ⅰ类和Ⅱ类储层)非均质性强,具有单层厚度薄,纵向上多层发育(图2),平面上大面积叠置分布的特点。

2 准同生溶蚀特征

2.1 沉积结构构造特征

通过对研究区钻井岩心的系统观察,发现旋回内部发育大量暴露侵蚀面及典型准同生暴露标志,如渗流豆粒(图3a)、溶塌角砾(图3b)、钙结壳构造(图3c)、鸟眼构造、葡萄状胶结物等,另外可见到平行于层面的溶蚀面、溶蚀坑(图3d)、示底构造、窗格孔(图3e)和少量膏模孔、粒内溶孔、铸模孔(图3f)等早期溶蚀孔隙发育。渗流豆粒和钙结壳层的出现,一般代表向上变浅的沉积旋回的顶界[21],反映该地区出现过小型沉积暴露面。这种小型沉积暴露面纵向上可识别出多套(图2),代表了循环往复的准同生暴露溶蚀的发生。

2.2 孔隙特征

铸体薄片和扫描电镜观察表明,川西气田雷四上亚段发育大量组构选择性溶蚀孔隙,包括窗格孔、藻间溶孔、粒间溶孔、铸模孔/粒内溶孔和少量膏模孔等。统计表明,研究区组构选择性溶蚀的孔隙占总储集空间的60%以上。其中,窗格孔常呈层状发育(图3e),主要出现在下储层段的藻纹层白云岩中;藻粒间溶孔在下储层段藻砂屑藻凝块白云岩中较常见;铸模孔/粒内溶孔发育程度并不高,主要出现在藻砂屑白云岩中,上、下储层段均可见;膏模孔和膏溶孔较少见。岩心观察发现,组构选择性溶孔的分布具有较好的规律性:溶孔集中发育段多与孔隙欠发育的致密层段交互出现,且集中在组构选择性溶孔发育段的上部,常伴有准同生溶蚀产生的鸟眼构造以及平行或低角度的溶蚀面出现。

2.3 岩石阴极发光特征

受到大气淡水改造影响的岩石,阴极射线下发光性变强[22]。通过对孔隙欠发育段和孔隙发育段样品的阴极发光特征对比发现,孔隙发育段的溶蚀孔隙边缘发光性往往比基质要强(图4a与图4c中的②),说明这些溶蚀孔隙的产生与大气淡水有关;而从孔隙边缘发光性变强的区域向基质延伸有限的特征来看,大气淡水的参与作用应较为有限。因此,研究区雷四段这一期的溶蚀应属于典型的高频层序控制下的短期、多期次暴露溶蚀作用。

另外,研究区窗格孔中第一期等厚环边白云石

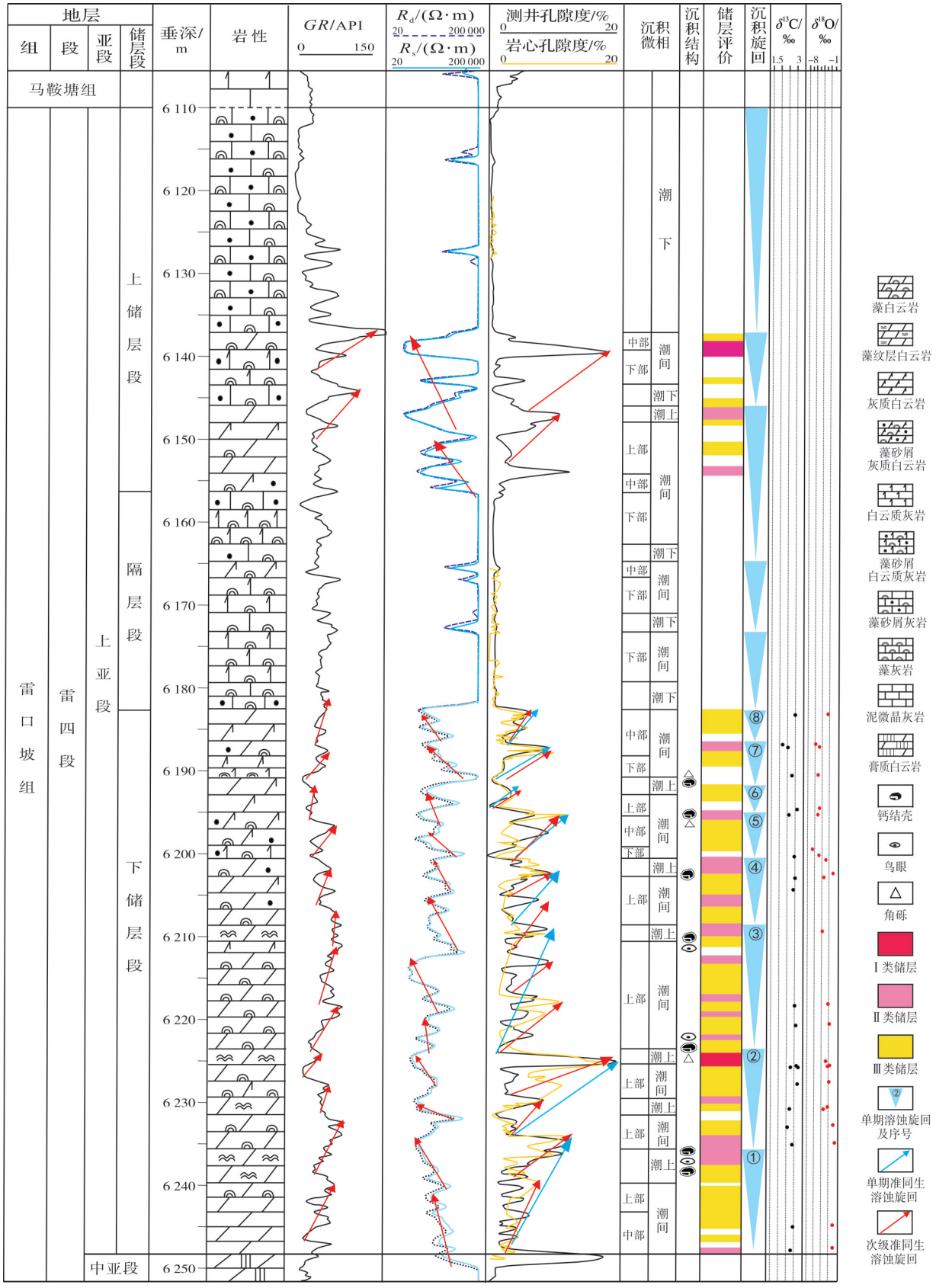
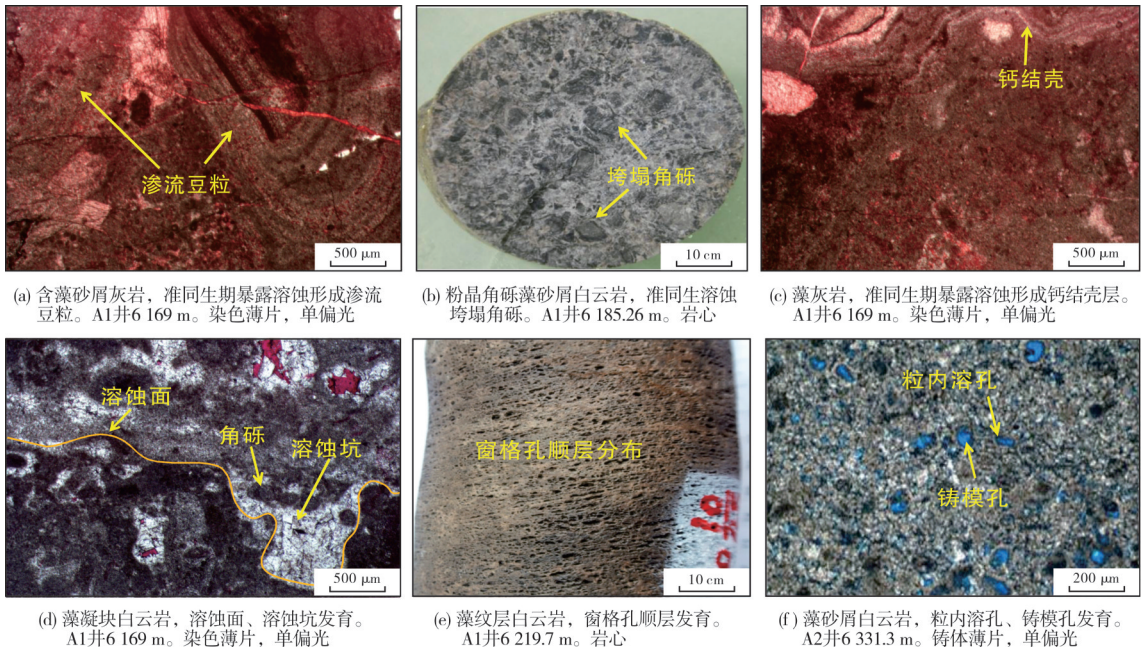


图2 川西气田A1井雷口坡组四段上亚段综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of upper submember of the Leikoupo Member 4 of Well A1 in Chuanxi Gasfield

胶结物阴极射线下发褐色光(图4c之③),而基质白云石也发褐色光(图4c之①),两者发光基本一致,表明它们的形成环境基本相同,成岩流体均为海水,而被充填的孔隙应形成于准同生期。



(a) 含藻砂屑灰岩,准同生期暴露溶蚀形成渗流豆粒。A1井6 169 m。染色薄片,单偏光

(b) 粉晶角砾藻砂屑白云岩,准同生溶蚀垮塌角砾。A1井6 185.26 m。岩心

(c) 藻灰岩,准同生期暴露溶蚀形成钙结壳层。A1井6 169 m。染色薄片,单偏光

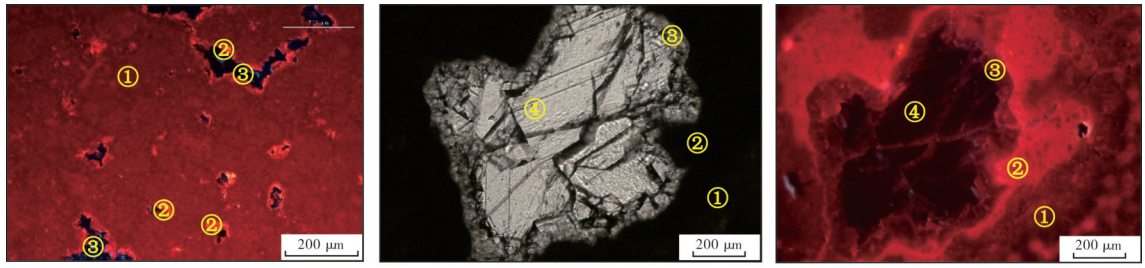
(d) 藻凝块白云岩,溶蚀面、溶蚀坑发育。A1井6 169 m。染色薄片,单偏光

(e) 藻纹层白云岩,窗格孔顺层发育。A1井6 219.7 m。岩心

(f) 藻砂屑白云岩,粒内溶孔、铸模孔发育。A2井6 331.3 m。铸体薄片,单偏光

图3 川西气田雷四上亚段准同生溶蚀特征照片

Fig. 3 Photos showing penecontemporaneous dissolution of upper submember of the Leikoupo Member 4 in Chuanxi Gasfield



(a) 藻粘结白云岩。基质①阴极发光呈褐色,孔隙边缘②阴极发光变强,呈橙红色,孔隙③不发光。A1井,6 234.9 5 m。阴极发光

(b) 藻粘结白云岩。①②为基质白云石,③为溶孔边缘充填的马牙状微粉晶白云石环边,④为孔隙中充填的方解石。A3井5 769.35 m。普通薄片,单偏光

(c) 视域同(b)。基质①发褐色光,溶孔外边缘基质②发橙红色,溶孔内边缘粉晶白云石③发褐色光,溶孔内方解石④不发光。A3井5 769.35 m。阴极发光

图4 川西气田雷四上亚段岩石阴极发光特征

Fig. 4 Cathodoluminescence characteristics of upper submember of the Leikoupo Member 4 in Chuanxi Gasfield

2.4 碳氧同位素特征

碳氧同位素组成在受到大气淡水淋滤作用过程中均会发生变轻、变低的现象[23-24]。本次研究选取多期高频暴露溶蚀现象清晰且连续取心的A1井岩心进行分析。分析数据表明:总体上,$\delta^{13}C_{PDB}$值为1.71‰~3.30‰,平均值为2.65‰;$\delta^{18}O_{PDB}$值为-5.92‰~-1.06‰,平均值为-3.88‰。相比之下,暴露溶蚀面附近样品的$\delta^{13}C_{PDB}$偏低,为1.71‰~2.52‰,平均值为2.19‰,更接近于三叠纪海水的平均值(2‰)[11];暴露溶蚀面附近样品的$\delta^{18}O_{PDB}$偏低,为-7.02‰~-1.06‰,平均值为-4.52‰,远低于三叠纪海水的平均值(-0.8‰~-0.5‰)[25]。纵向上碳氧同位素组成值变化具有一定的旋回性,单一旋回内自上而下随着离暴露面距离的增加,碳氧同位素组成值负偏程度逐渐减弱(图2)。这表明距暴露面越近,受淡水影响越大,这从另一方面证实了多期高频暴露与淡水岩溶的存在。

3 准同生溶蚀对优质储层分布的影响

3.1 准同生溶蚀分布特征

以渗流豆粒、钙结壳层、原地垮塌角砾的出现

为准同生溶蚀标志，对川西气田南部的A1井和北部的A3井两口取心较全的井进行系统观察分析，认为准同生溶蚀作用发育层位的岩性以各类白云岩为主，主要为潮间带中部—上部沉积。纵向上，隔层段和上储层段准同生溶蚀作用较弱，仅上储层段的下部发育准同生溶蚀；而下储层段准同生溶蚀作用较强，可识别出8期（图2），单期溶蚀对应的地层厚度为4~15 m，而且2口取心井横向上可进行较好的对比。因此，研究区准同生溶蚀作用具有单期暴露溶蚀时间短、面积大及多期次频繁暴露溶蚀的特征。

对取心井单期准同生溶蚀的电性特征进行分析，认为单期溶蚀旋回通过*GR*和深浅电阻率曲线可进行较好的识别：单一旋回自下而上靠近暴露面，具有*GR*值变高、深浅电阻率值变低的特征（图2）。通过电性特征在下储层段的8期准同生溶蚀内部可进一步识别出多期的次级准同生溶蚀（图2，红色箭头所示，共12期）。次级准同生溶蚀的单层厚度为4~8 m，但这些次级溶蚀旋回在横向上对比性不强，而与优质储层的分布有较好的对应关系，表现为优质储层主要分布在单个高频旋回的中上部（图2）。这一认识对开展非取心井的准同生溶蚀期次和分布特征研究具有指导意义。

3.2 准同生溶蚀强度对优质储层分布的影响

潮坪沉积环境发育的层序结构为典型的向上变浅沉积旋回，但潮上带、潮间带和潮下带由于水体动力条件不同，向上变浅沉积旋回的垂向序列特征差异较大，直接影响了准同生溶蚀作用的强度，进而影响优质储层的分布（图5）。

潮下—潮间下部沉积旋回 水体相对高能，颗

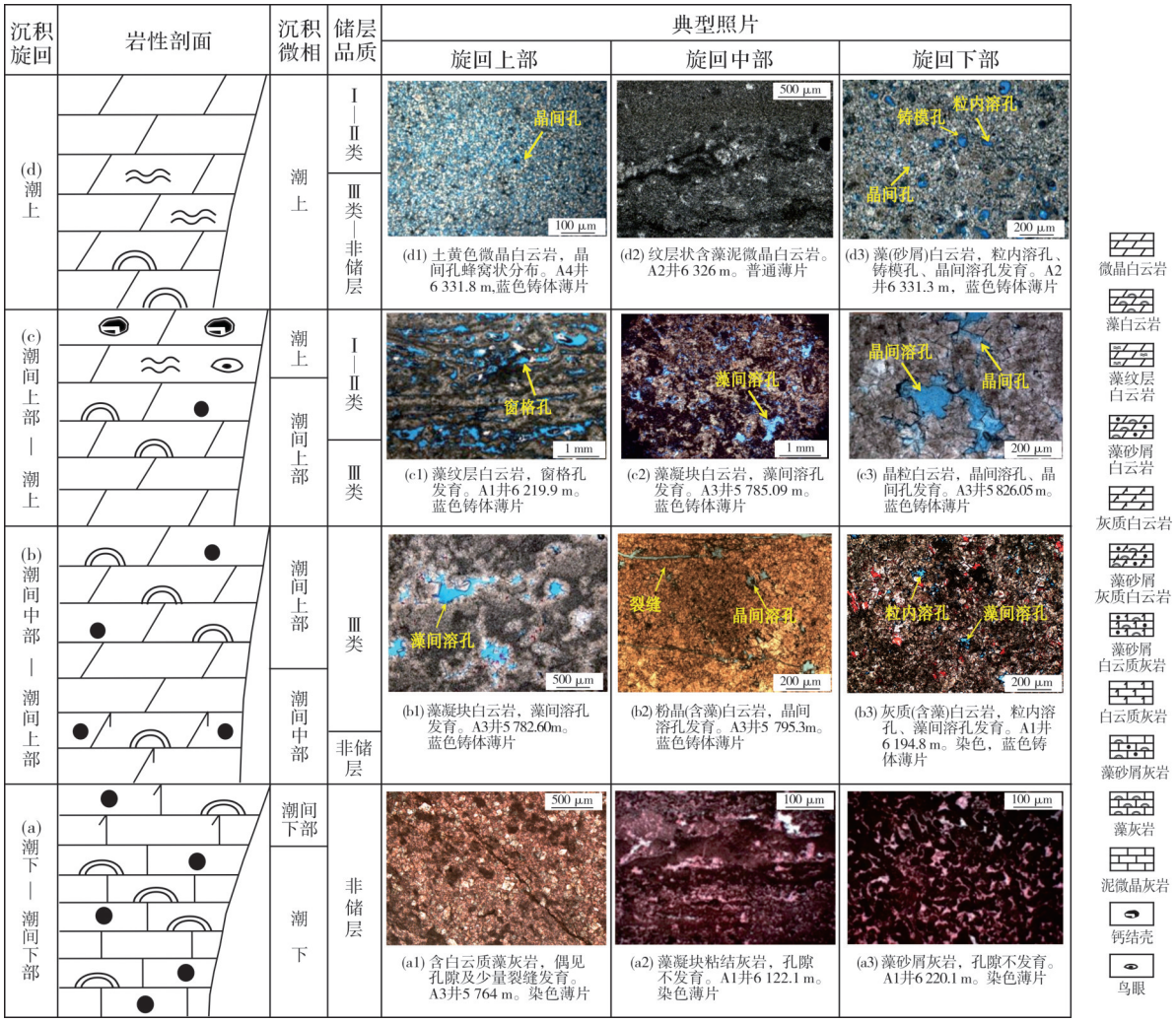


图5 川西气田雷四上亚段潮坪环境不同类型高频沉积旋回的垂向序列特征（薄片：单偏光）

Fig. 5 Vertical sequence characteristics of different types of high-frequency sedimentary cycles in the tidal flat of upper submember of the Leikoupo Member 4 in Chuanxi Gasfield (thin section, single polarized light)

粒较发育，以灰岩为主，可见少量小壳的介形虫和有孔虫伴生，构造以块状层理为主。旋回下部岩性为潮下沉积的泥粉晶藻砂屑灰岩，可见少量亮晶胶结；向上过渡为潮间下部沉积的藻砂屑白云质灰岩（图5a）。由于水体相对较深，较少受大气淡水影响，准同生溶蚀作用较弱，不利于储层发育。这类旋回主要分布在川西气田雷四上亚段上部灰岩段。

潮间中部—潮间上部沉积旋回 水体能量中等，旋回下部岩性为潮间中部沉积的藻砂屑灰质白云岩、含灰质白云岩和少量泥粉晶白云岩；旋回上部岩性为潮间上部沉积的泥粉晶白云岩和大量藻砂屑藻凝块白云岩（图5b），发育鸟眼构造、藻叠层构造等典型标志。这类沉积旋回很少出露水面，但可接受大气淡水改造，准同生溶蚀强度中等，局部可见少量暴露标志。溶蚀作用在旋回中上部的藻砂屑藻凝块白云岩和泥粉晶白云岩中形成粒间溶孔、少量粒内溶孔和晶间溶孔，多形成Ⅲ类储层；旋回底部多为非储层。这类旋回主要分布在川西气田雷四上亚段下储层段。

潮间上部—潮上沉积旋回 水体能量相对较低，旋回下部岩性主要为潮间上部沉积的泥粉晶白云岩、藻砂屑藻凝块白云岩；旋回上部岩性为潮上沉积的藻纹层白云岩（图5c），可见窗格孔构造。这类旋回海平面变化最频繁，沉积物最容易发生暴露，准同生溶蚀作用最强。旋回顶部可见钙结壳、葡萄状胶结物、渗流豆粒、鸟眼构造、溶塌角砾及渣积层等溶蚀标志，是淡水成岩作用的结果。该类旋回有利于形成大量组构选择性溶蚀孔隙，对优质储层（Ⅰ—Ⅱ类）的控制作用较明显。这类旋回主要分布在川西气田雷四上亚段下储层段。

潮上沉积旋回 长期暴露，水体能量最低，沉积作用较弱，厚度薄（单个旋回一般小于3 m）。旋回下部岩性为薄层含藻球粒藻凝块白云岩和含藻纹层泥晶白云岩，上部为土黄色的针孔状泥晶白云岩（图5d）。准同生暴露溶蚀作用较强，形成粒内孔、铸模孔和晶间溶孔等。这类旋回较少出现，主要发育在雷四上亚段上储层段的白云岩夹层中，是上储层段薄层优质高孔白云岩储层的主要贡献者。

基于上述分析认为，准同生溶蚀作用的发生与高频旋回密切相关。潮间上部—潮上沉积旋回准同生溶蚀作用最强，有利于Ⅰ—Ⅱ类优质储层发育。纵向上，单个沉积旋回内部实测孔隙度变化较大，由旋回顶部向下孔隙度有逐渐变低的特征，这与准同生溶蚀作用由旋回顶面向下变弱有关。统计结果表明，5 m是单个沉积旋回准同生溶蚀作用的深度下限。单个沉积旋回厚度越大，则纵向上优质储层连续性越差；反之，单个沉积旋回厚度越小，优质储层纵向上发育越集中，横向上分布越连续（图2）。

4 结 论

（1）川西气田中三叠统雷口坡组四段上亚段潮坪相白云岩普遍发育准同生溶蚀作用，伴有大量短期暴露面特有的渗流豆粒、钙结壳、鸟眼构造，间歇性淡水溶蚀形成的溶塌角砾、溶蚀面、溶蚀坑，以及选择性溶蚀孔如窗格孔、粒内溶孔、铸模孔等多种典型特征。

（2）潮坪相准同生溶蚀具有单期暴露溶蚀时间短，单个高频沉积旋回中上部溶蚀作用强，纵向上多期溶蚀频繁叠加，横向上同期溶蚀对比性较好、分布面积大的特征。准同生溶蚀强度受高频沉积垂向序列特征和单个沉积旋回厚度共同控制。

（3）川西气田主要发育潮下—潮间下部、潮间中部—潮间上部、潮间上部—潮上、潮上等4种类型的高频沉积旋回。其中，潮间上部—潮上旋回准同生溶蚀作用最强，单一旋回地层厚度为4~15 m，自下而上距离暴露面越近，孔隙越发育，碳氧同位素组成值略变低，测井*GR*值变高、深浅电阻率值变低。单个旋回的中上部准同生溶蚀作用最强，优质储层纵向上呈薄层分布；单个旋回厚度小于5 m时，优质储层纵向上发育比较集中，横向上分布比较连续。

参 考 文 献

[1] 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.
LI Shubing, XU Guoming, SONG Xiaobo. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in Longmenshan piedmont tectonic belt, Western Sichuan Basin[J]. China petroleum exploration, 2016, 21(3): 74-82.

[2] 陈昱林, 曾焱, 吴亚军, 等. 川西雷口坡组气藏储层类型及孔隙结构特征[J]. 断块油气田, 2018, 25(3): 284-289.
CHEN Yulin, ZENG Yan, WU Yajun, et al. Reservoir types and pore structure characteristics of Leikoupo Formation carbonate reservoir in Western Sichuan[J]. Fault-block oil and gas field, 2018, 25(3): 284-289.

[3] 周凌方, 钱一雄, 宋晓波, 等. 四川盆地西部彭州气田中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩孔隙表征、分布及成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 177-188.
ZHOU Lingfang, QIAN Yixiong, SONG Xiaobo, et al. Characteristics, distribution and origin of dolomite reservoir in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic, Pengzhou gas field, Western Sichuan Basin[J]. Oil & gas geology, 2020, 41(1): 177-188.

[4] 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.
LI Hongtao, HU Xiangyang, SHI Yunqing, et al. Sequence division and controlling factors of reservoir development of the 4th member of Leikoupo Formation in foreland of Longmen Mountains in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & gas geology, 2017, 38(4): 753-763.

[5] 陈安清, 杨帅, 陈洪德, 等. 陆表海台地沉积充填模式及内克拉通碳酸盐岩勘探新启示[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1243-1256.
CHEN Anqing, YANG Shuai, CHEN Hongde, et al. The sedimentary filling model of epeiric platform and new inspiration of innercratonic carbonate for oil and gas exploration[J]. Acta petrologica sinica, 2017, 33(4): 1243-1256.

[6] 刘树根, 宋金民, 罗平, 等. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 129-152.
LIU Shugen, SONG Jinmin, LUO Ping, et al. Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2016, 43(2): 129-152.

[7] 李勇, 邓美洲, 李国蓉, 等. 川西龙门山前带雷口坡组四段古表生期大气水溶蚀作用对储集层的影响[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 56-63.
LI Yong, DENG Meizhou, LI Guorong, et al. Palaeokarst characteristics and effects on reservoirs in the fourth member of Leikoupo Formation, Longmen Mountain front, Western Sichuan Basin[J]. Petroleum geology and experiment, 2021, 43(1): 56-63.

[8] 卞从胜, 汪泽成, 江青春, 等. 四川盆地川西地区雷口坡组岩溶储层特征与分布[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 82-94.
BIAN Congsheng, WANG Zecheng, JIANG Qingchun, et al. Characteristics and distribution of karst reservoirs in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin[J]. China petroleum exploration, 2019, 24(1): 82-94.

[9] 宋晓波, 王琼仙, 隆轲, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组古岩溶储层特征及发育主控因素[J]. 海相油气地质, 2013, 18(2): 8-14.
SONG Xiaobo, WANG Qiongxian, LONG Ke, et al. Characteristics and main controlling factors of Middle Triassic Leikoupo paleokarst reservoirs in Western Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2013, 18(2): 8-14.

[10] 李蓉, 许国明, 宋晓波, 等. 川西坳陷雷四^{3}亚段储层控制因素及孔隙演化特征[J]. 东北石油大学学报, 2016, 40(5): 63-74.
LI Rong, XU Guoming, SONG Xiaobo, et al. Reservoir characteristics and control factors of the third period of the forth Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2016, 40(5): 63-74.

[11] 王琼仙, 宋晓波, 王东, 等. 川西龙门山前雷口坡组四段储层特征及形成机理[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 491-497.
WANG Qiongxian, SONG Xiaobo, WANG Dong, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the 4th member of the Leikoupo Formation in Longmen Mountain front[J]. Petroleum geology and experiment, 2017, 39(4): 491-497.

[12] 王远翀, 刘波, 姜伟民, 等. 川西中三叠统雷口坡组四段微生物岩沉积-成岩演化及储层成因[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 22-33.
WANG Yuanchong, LIU Bo, JIANG Weimin, et al. Sedimentary, diagenetic evolution and reservoir formation of microbialites in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (natural science), 2020, 39(6): 22-33.

[13] 肖开华, 李宏涛, 段永明, 等. 四川盆地川西气田雷口坡组气藏储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 34-44.
XIAO Kaihua, LI Hongtao, DUAN Yongming, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Leikoupo gas pools in the Western Sichuan Basin[J]. Natural gas industry, 2019, 39(6): 34-44.

[14] 沈安江, 周进高, 辛勇光, 等. 四川盆地雷口坡组白云岩储层类型及成因[J]. 海相油气地质, 2008, 13(4): 19-28.
SHEN Anjiang, ZHOU Jingao, XIN Yongguang, et al. Origin of Triassic Leikoupo dolostone reservoirs in Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2008, 13(4): 19-28.

[15] 何治亮, 张军涛, 丁茜, 等. 深层—超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 633-644, 763.
HE Zhiliang, ZHANG Juntao, DING Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & gas geology, 2017, 38(4): 633-644, 763.

[16] 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.
HE Zhiliang, GAO Zhiqian, ZHANG Juntao, et al. Types of sequence boundaries and their control over formation and distribution of quality carbonate reservoirs[J]. Oil & gas geology, 2014, 35(6): 853-859.

[17] TANG Hao, TAN Xiucheng, LIU Hong, et al. Genesis and dolomitization of "Khali" powder crystal dolomite in Triassic Jialingjiang Formation, Moxi gas field, Central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2014, 41(4): 553-562.

[18] 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 等. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 441-456.
TAN Xiucheng, XIAO Di, CHEN Jingshan, et al. New advance and enlightenment of eogenetic karstification[J]. Journal of palaeogeography, 2015, 17(4): 441-456.

[19] 谢康, 谭秀成, 冯敏, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田东区奥陶系马家沟组早成岩期岩溶及其控储效应[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1159-1173.
XIE Kang, TAN Xiucheng, FENG Min, et al. Eogenetic karst and its control on reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, eastern Sulige gas field, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(6): 1159-1173.

[20] LI Ling, TAN Xiucheng, ZENG Wei, et al. Development and reservoir significance of mud mounds in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum exploration and development, 2013, 40(6): 714-721.

[21] 范嘉松, 吴亚生. 贵州中三叠统上部垄头组的沉积性质:

再论其钙结壳的成因[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 149-155.
FAN Jiasong, WU Yasheng. Sedimentological nature of late Middle Triassic Longtou Formation in Guizhou Province: re-discussion on the origin of its caliche crusts[J]. Acta geologica sinica, 2004, 78(2): 149-155.

[22] 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008, 33(1): 26-34.
HUANG Sijing, QING Hairuo, HU Zuowei, et al. Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan Basin of China [J]. Earth science (Journal of China University of Geosciences), 2008, 33(1): 26-34.

[23] 李儒峰, 刘本培. 碳氧同位素演化与碳酸盐岩层序地层学关系研究[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1996,21(3): 29-34.
LI Rufeng, LIU Benpei. Application of carbon and oxygen isotopes to carbonate sequence stratigraphy: analysis of Maping Formation, Southern Guizhou Province[J]. Earth science (Journal of China University of Geosciences), 1996,21(3): 29-34.

[24] 钱一雄, 何治亮, 李国蓉, 等. 重庆南川三汇场寒武系碳酸盐岩中不同期次大气淡水作用的证据[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 278-292.
QIAN Yixiong, HE Zhiliang, LI Guorong, et al. Evidence of multiepisode dissolution of meteoric fluids of the Middle and Upper Cambrian carbonate rocks of Sanhuichang outcrop, Nanchuan area, Chongqing[J]. Journal of palaeogeography, 2019, 21(2): 278-292.

[25] 钱一雄, 武恒志, 周凌方, 等. 川西中三叠统雷口坡组三段—四段白云岩特征与成因: 来自于岩相学及地球化学的约束[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1161-1180.
QIAN Yixiong, WU Hengzhi, ZHOU Lingfang, et al. Characteristic and origin of dolomites in the third and fourth members of Leikoupo Formation of the Middle Triassic in NW Sichuan Basin: constraints in mineralogical, petrographic and geochemical data[J]. Acta petrologica sinica, 2019, 35(4): 1161-1180.

编辑:董庸

Penecontemporaneous dissolution characteristics of tidal flat dolomite and its influence on the distribution of high-quality reservoirs of Leikoupo Formation in Chuanxi Gasfield, Western Sichuan Basin

WANG Qiongxian, SONG Xiaobo, DENG Meizhou, ZHANG Yan, GAO Hengyi, CHEN Lihua, LI Yong

Abstract: The tidal flat dolomite reservoir of the Middle Triassic Leikoupo Member 4 in Chuanxi Gasfield, Western Sichuan Basin is characterized by the development of a large number of fabric selective dissolution pores. The reservoir is distributed in a large area on the plane, but the high-quality reservoir is characterized by longitudinal thin and transverse discontinuous distribution, and the spatial distribution law is unclear, which directly affects the deployment of highly deviated horizontal wells in Chuanxi Gasfield. By observing the rock structure and pore characteristics of the reservoir through cores and thin sections, and using the test data of rock carbon and oxygen isotopes and cathodoluminescence, combined with the analysis of the vertical sequence characteristics of high-frequency sedimentary cycles of tidal flat facies, the penecontemporaneous dissolution characteristics, the controlling factors of dissolution intensity and the influence of penecontemporaneous dissolution on the distribution of high-quality reservoirs in Leikoupo Member 4 of Chuanxi Gasfield are studied. The results show that: (1) Penecontemporaneous dissolution characterized by the development of seepage bean particles, calcium crusts and layered pane pores is the key controlling factor for the distribution of high-quality reservoirs in Leikoupo Formation. (2) Controlled by the high-frequency sedimentary cycle due to frequent sea-level changes in the tidal flat environment, penecontemporaneous dissolution is characterized by short single-stage exposure and dissolution time, large area and multi-stage superimposed exposure and dissolution. The penecontemporaneous dissolution intensity is controlled by the vertical sequence characteristics of sedimentary cycles and the thickness of a single sedimentary cycle. (3) Four types of sedimentary cycles are mainly developed in Chuanxi Gasfield, among which the high-frequency sedimentary cycle formed in the upper intertidal-supratidal zone is the most conducive to the occurrence of penecontemporaneous dissolution. From bottom to top in a single sedimentary cycle, the closer to the exposed surface, the pores are more developed, the slightly lower the carbon and oxygen isotopic composition value, the higher the logging *GR* value, and the lower the deep and shallow resistivity. The penecontemporaneous dissolution in the middle and upper part of a single cycle is the strongest, which is easy to form high-quality reservoirs. When the thickness of a single cycle is less than 5 m, the high-quality reservoirs is relatively concentrated in the vertical direction and continuous in the horizontal direction.

Key words: tidal flat; dolomite; high-frequency sedimentary cycle; penecontemporaneous dissolution; high quality reservoirs; Leikoupo Formation; Chuanxi Gasfield

WANG Qiongxian, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in reservoir geology of carbonate rocks. Add: No. 688 Jitai Rd., High-tech Zone, Chengdu, Sichuan 610081, China