

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

周凌方^{1,2}, 钱一雄¹, 宋晓波³, 曹波³, 尤东华¹, 李勇³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 四川 成都 610041; 3. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 彭州气田雷口坡组四段上亚段的微生物白云岩和微粉晶白云岩是油气主要的储集岩。在此, 采用了多种分析手段及统计方法, 深入研究了主要岩性的孔隙类型、物性和孔隙结构参数及其与岩相(尤其是微生物岩)、白云石晶体大小等关系, 综合划分出4种储集体类型及致密层段(隔层), 初步提出了孔隙形成与分布的主控因素。研究表明: 具残余藻结构的白云岩占近四分之三多为泥微晶、粉晶白云石; 高频旋回中, 自下而上, 以藻凝块—藻球粒(藻砂屑)—藻纹层—纹层泥晶; 晶粒以颗粒—粉(细)晶—微晶—泥晶呈规律变化; 中三叠世的干燥—炎热、超盐度和碱性沉积环境利于微生物岩发育, 潮下带上部凝块—叠层石至潮间藻纹层—叠层石至潮上带的薄(藻)纹层的向上变浅的米级旋回, 导致中、上部往往发育高孔渗带; 早期快速的渗透回流白云岩化及大气淡水作用、浅埋藏期的烃类充注及多期构造裂隙对孔隙演化均起了重要的作用。

关键词: 储层表征; 储集体分布; 储层成因; 白云岩; 雷口坡组; 彭州气田; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characteristics, distribution and origin of dolomite reservoir in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic, Pengzhou gas field, western Sichuan Basin

Zhou Lingfang^{1,2}, Qian Yixiong¹, Song Xiaobo³, Cao Bo³, You Donghua¹, Li Yong³

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil and Gas Branch of SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Microbiological and micritic-calcsiltic dolomites have been regarded as the dominant reservoir lithology in the upper section of the 4th member of the Leikoupo Formation in Pengzhou gas field. Multiple analytical and statistical methods are applied to study the pore types, physical properties, and pore structure parameters, as well as their impact on lithofacies (especially for microbialite) and crystal size of the dolomites. Besides, four types of reservoirs and the tight zones (interlayers) are identified. The main factors controlling pore formation and distribution are hereby proposed. The results show that dolomites with various microbial textures account for nearly 3/4 of the total formation, most of which are silty-micritic and calcsiltic dolomites. In a high-frequency cycle, the dolomite textures vary upwards from algal clot, to algal spheroid (or algal arene), to algal lamina, and then to laminated silty types. In terms of grain size, a cycle is composed regularly of grained, very fine- (fine-) crystal, micritic, and silty dolomites from the bottom to the top. A dry, hot and alkaline sedimentary environment of hypersalinity prevailed during the Middle Triassic, favorable for the development of microbialites. The meter-scale shallowing-upward cycles of thin (algal) laminae, that is, from the thrombolites and stromatolites in the upper part of the subtidal zone to the intertidal algal laminae-stromatolites, and then

收稿日期: 2019-08-08; 修订日期: 2019-11-08。

第一作者简介: 周凌方(1969—), 男, 高级工程师, 岩石矿物学。E-mail: jzzl309@21cn.com。

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDAXX010201-3); 深地项目(2017YFC060310); 国家自然科学基金联合基金项目(U1663209); 中国石化西南油气分公司项目(3445000-14-ZC0607-0025)。

to the thin (algal) laminae in the supratidal zone, caused the well development of zones of high porosity and permeability in the upper and middle parts of the sequence. In addition, factors including rapid seepage reflux dolomitization and meteoric freshwater dissolution, early hydrocarbon charging in the shallow burial stage, and multi-stage tectonic fracturing, all play an important role in pore development and preservation.

Key words: reservoir characterization, distribution of reservoirs, origin of reservoirs, dolomite, Leikoupo Formation, Pengzhou gas field, Sichuan Basin

四川盆地中三叠统雷口坡组油气勘探始于20世纪70年代。2006年川科1井在兼探雷口坡组中实现了川西雷口坡组的重大的油气突破。2012年以来的PZ1井、YS1井和SYS1井相继高产、并由此发现了彭州雷口坡组四段上亚段(雷四上亚段)气藏。前人研究表明:川西的中三叠世在干燥、炎热为主、偶夹潮湿古气候条件下,发育了大套泥粉晶白云岩、云质泥晶灰岩(尤其与微生物碳酸盐岩)及膏岩沉积。雷口坡组为蒸发潟湖、潮坪、局限台地、局部为开阔台地的沉积环境^[1]。彭州雷四上亚段在纵向上储层与夹层呈不等厚叠置分布,为孔隙型及孔隙-裂缝双重介质的储集体。与残余藻结构有关的组构孔(洞)或藻格架孔、晶间孔、晶间溶孔以及微裂

隙是主要储集空间,总体上具有低孔、中-低渗特征^[2-4]。孙伟^[5]指出储层孔喉比较大,微观连通性差,储量动用难度较大,采收率一般为40%。因此,不同类型孔隙类型、结构、成因及分布是油气开发中的焦点问题之一。

本文报道了对彭州地区5口取心井及2条实测剖面的孔隙发育特征及成因研究的部分结果(图1)。主要包括1000件左右的样品的薄片、铸体片观察、阴极发光(CL)和微区同位素等岩相学-地球化学研究,并结合测井,采用了孔隙与裂隙图像识别与分析系统(PCAS)中的大量统计工作、扫描电镜(SEM)、注汞毛细管压力(MICP)和盖层全孔隙等分析技术手段,研究

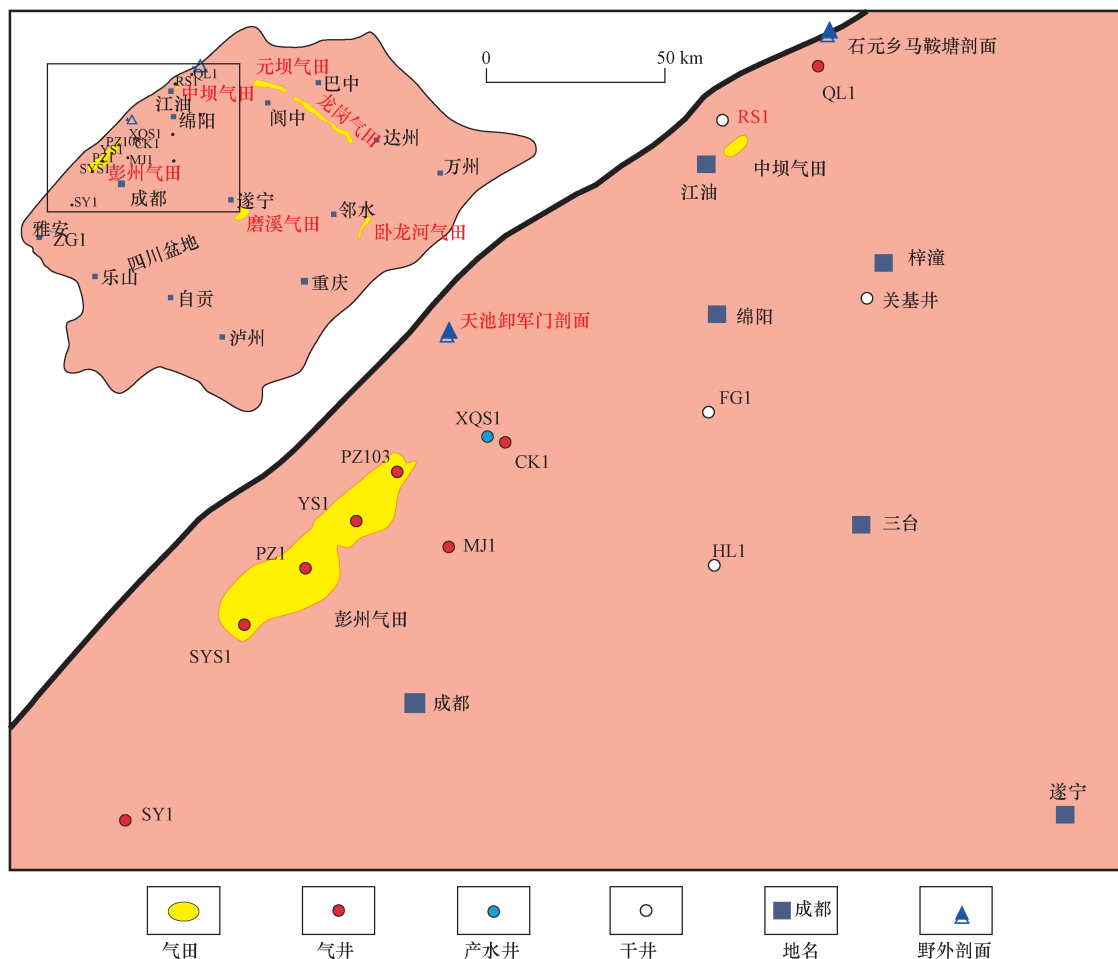


图1 川西地区中三叠统雷口坡组四段上亚段钻井及实测剖面位置

Fig. 1 The location of wells and geological sections for the upper Lei 4 member of the Middle Triassic, Western Sichuan

了雷四上亚段储集体中的孔隙分类和孔隙结构特征,讨论岩相、孔隙类型及物性的关系,初步提出了储集体评价的指标;综合展示了单井雷四上亚段中的部分储集体岩相、孔隙类型和物性等特征,探讨了储层成因。

1 孔隙分类及特征

1.1 孔隙分类

以 P. W. Choquette, F. J. Lucia^[6-7] 和 C. Hollis 等^[8] 的碳酸盐岩孔隙分类为基础,综合了岩心、铸体薄片、薄片观察、全孔隙结构测定、压汞分析、物性分析和扫面电镜、微米 X - 射线层析成像(微米 CT)^[9]、聚焦离子束扫描电子显微镜(FIB - SEM)资料,将川西雷口坡组储集空间分为:沉积 - 早期成岩组构溶蚀孔洞(A)、成岩期组构 - 非组构溶蚀孔洞(B)、构造裂隙 - 非组构溶蚀孔洞(C)及微孔隙(D)4 种类型(表 1;图 2)。有关微孔隙的研究成果将在后续论文中阐述。

1.2 孔隙与岩性关系

正如 Lucia 等(2004),渗透率是颗粒大小与孔隙类型的函数。而孔隙类型与岩性特征也存在一定的联系^[10-12]。为探讨孔隙的发育与岩性(不同类型白云石、结构大小)的关系,利用四川大学孔隙特征图像分析系统、南京大学孔隙与裂隙图像识别与分析系统(PCAS),统计了川西的马鞍塘剖面中雷四上亚段的不同残余藻结构白云石晶体粒度大小(图 3)以及彭州气田 PZ1 井、YS1 井和 SYS1 井中不同(残余)藻结构的白云石与孔隙发育程度(面孔率)关系(图 4)。

统计表明:①藻结构占白云岩类储层高达 75%,藻结构的白云岩中,白云石的晶体主要为泥晶、微晶和粉晶 3 种;②粉晶/砂屑结构的白云岩和具藻结构的微 - 粉晶白云岩较其他岩类更易形成储集空间;③不

同藻结构的岩石中,藻纹层/藻粘结云岩比藻球粒/藻砂屑和藻凝块/藻团块云岩易形成溶蚀孔隙;④从藻凝块或藻团块—藻球粒或藻砂屑—藻纹层或藻粘结白云岩序列,面孔率呈逐渐增大的趋势;⑤从晶粒大小变化趋势,泥晶—微晶—粉晶,面孔率也逐渐升高;⑥藻结构的白云岩随着白云石的晶粒变大,面孔率也越来越高(图 4);⑦自下而上分为 7 个米级旋回,藻结构以藻凝块—藻球粒(藻砂屑)—藻纹层—纹层泥晶;晶粒以颗粒—粉(细)晶—微晶—泥晶呈规律变化。

总体来看,具有残余藻结构白云岩中的晶体粒度的相对细小,多为泥微晶、粉晶;前者发暗紫色、紫红、玫瑰红、橙红等(CL),有序度平均小于 0.60;后者发橙红、紫红、玫瑰红及暗紫色为主;有序度平均小于 0.70^[13]。表明了后期的成岩改造相对较弱,微生物岩中孔隙或早期白云化产生的孔隙得以大部分保存。

2 孔隙结构及物性

2.1 孔隙结构

众所周知,压汞法只适用于测定大孔(50 ~ 100 nm)和微米级孔(大于 0.1 μm)的比表面积、孔隙率。理论上,压汞法测定孔径范围是 0.006 4 ~ 426 μm,但实际上对于纳米级别的孔隙测定是不准确的。在高压下,许多纳米级别的孔会发生变形甚至压塌,致使结果偏离理论值^[14];研究表明本区储集体的孔隙以中、小孔为主,喉道以细喉、微喉为主,孔喉组合以中孔 - 细喉为主,喉道半径主要集中在 24 ~ 200 nm,约占 56%,在此仅根据注录毛细管压力数据,讨论不同类型白云岩的孔隙结构^[15-18]。

对 YS1 井的 44 件白云岩类的压汞分析数据,按常见的泥微晶、微粉晶、藻球粒(藻砂屑)、藻凝块(藻团块)和藻纹层(藻粘结)白云岩等 5 种进行阐述(图 5;表 2)。

表 1 彭州气田中三叠统雷四上亚段碳酸盐岩储集空间主要类型及其分类

Table 1 Classification of reservoir space for carbonate rocks in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic in Pengzhou gas field

类型	组构选择性	种类及特征
A	组构选择性溶蚀	粒间孔 IP、晶间孔 BC、粒内孔 WP、窗格孔 FE、遮蔽孔 SH、铸模孔 MO、与生物有关格架(GF)、微生物席(凝块、核形石、藻纹层 - 叠层石等)藻菌有关的有机孔 OM、膏溶模孔、生物扰动 - 钻孔 - 遗迹、潜穴 BO - BU 等
B	组构 - 非组构溶蚀	角砾间(溶)孔,窗格溶孔(洞)、膏溶孔洞、各种残余孔(洞)等
C	裂隙 - 非组构溶蚀	张扭裂隙、压扭剪切(X 共轭、雁行排列)、扩溶缝(洞)、溶孔洞(穴)、溶沟 - 渠道等
D	微孔隙	0.02 ~ 10 μm 孔隙,泥晶白云石、方解石晶间微孔;凝块、叠层石、藻纹层中微孔、粘土有机质中微孔以及晶体内微孔(石膏、天青石、萤石、黄铁矿等)

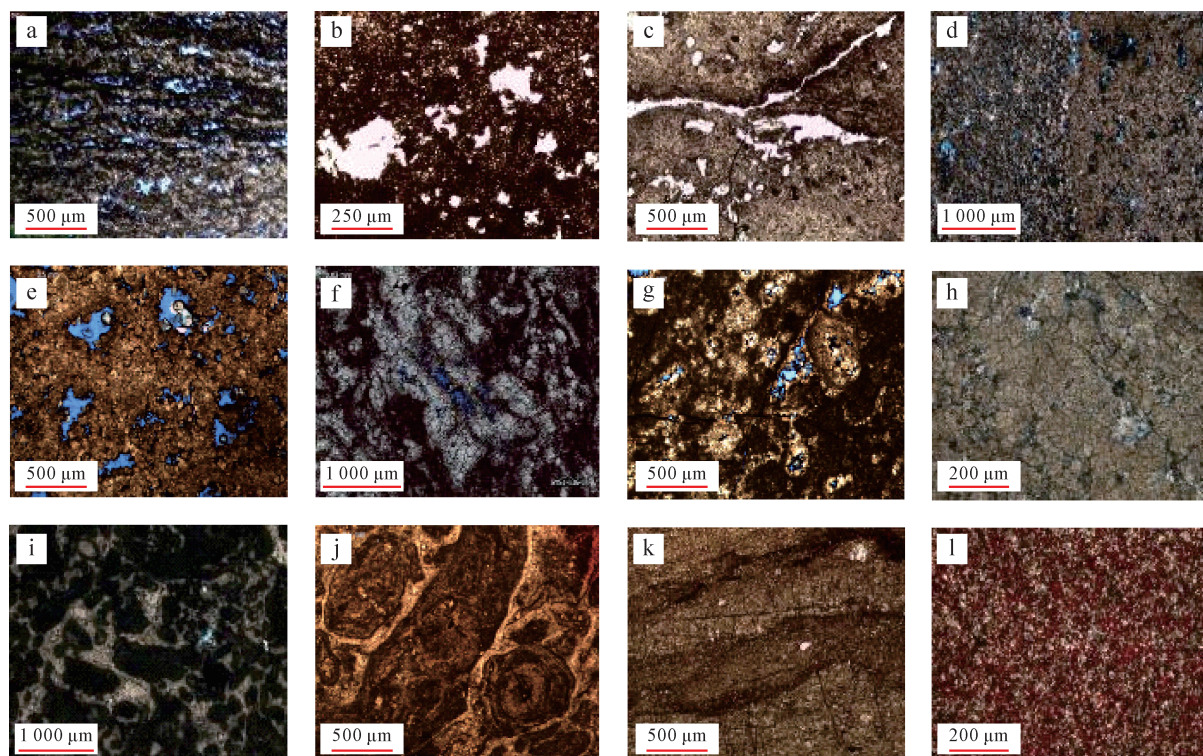


图2 彭州气田中三叠统雷四上亚段代表性碳酸盐岩岩石及孔隙类型

Fig. 2 Typical carbonate rocks and pore types observed in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic in Pengzhou gas field

a. YS1 井,埋深 5 793.95 m,藻纹层-叠层石云岩,明暗纹层,窗格扩溶-格架孔洞,暗色中的藻间溶孔洞较为发育,高孔高渗;b. YS1 井,埋深 5 793.95 m,残余藻纹层/球粒(50~100 μm,30%~40%)-泥微晶云岩,溶蚀孔洞 IP(50~100 μm),微裂隙,面孔率为 10%~12%,少量自形白云石(大小 0.5~0.8 mm),1/4~1/5 充填,高孔高渗;c. YS1 井,埋深 5 792.94 m,残余藻纹层-球粒云岩,发育扩溶的窗格孔洞,非组构的扩溶缝洞以及与藻纹层、球粒有关的 MO-IP(50~200 μm),半自形白云石直面镶嵌,二组开启微裂隙,面孔率一般为 2%~4%,局部达 6%~8%,高孔高渗;d. YS1 井,埋深 5 775.13 m,残余藻纹层-球粒云岩与残余凝(斑块)云岩,前者发育窗格(扩溶)孔、晶间(溶)孔;后者发育粒间孔、粒内溶孔及晶间(溶)孔,岩性分界面,受残余藻结构影响,自高孔高渗(左)-中低渗(右);e. SYS1 井,埋深 6 193.43 m,残余砂屑或鲕粒云岩,模糊的幻影构造,铸模孔、晶间(溶)孔,高孔高渗-中渗;f. SYS1 井,埋深 6 193.43 m,含粗枝藻的凝块粘结灰岩,发育泡沫绵层构造,粗枝藻或藻凝块中的 GF(0.01~0.05 mm),面孔率 1%~2%,大量粒间溶孔 IP(50~100 μm),1/4~1/5 被菱形白云石 D1(0.5~0.8 mm)充填,面孔率 3%~5%,局部达 10%~12%,中孔中渗;g. SYS1 井,埋深 6 191.87 m,含生屑-残余藻砂屑-球粒粘结的粉晶云岩,发育铸模孔或体腔残余孔隙、晶(粒)间(溶)孔、二组网状开启微裂隙,中孔中渗;h. SYS1 井,埋深 6 240.96 m,粉细晶白云岩,半自形-自形曲面-直面镶嵌结构,晶间孔,网状开启微裂隙,中低孔高渗;i. SYS1 井,埋深 6 228.22 m,含有孔虫的藻凝块灰岩,泥晶套,纤状-粒状胶结,少量溶孔及微裂隙,中低孔中低渗;j. SYS1 井,埋深 6 178.43 m,弱云化核形石灰岩,呈杂乱半球形 R,等晶粒状胶结,近圆形-椭圆形核形石中残留了生物钻孔或藻、菌(BSR?)斑点或丝带结构,低孔低渗;k. PZ1 井,埋深 5 766.85 m,残余藻纹层泥粉晶云岩,半自形白云石直面粒状镶嵌,极少量晶间溶孔 IP、横微裂隙(0.08~0.10 mm/条)受限于“残余藻纹层”中,局部呈网状扩溶缝孔(50~250 μm),低孔中高渗;l. SYS1 井,埋深 6 182.93 m,灰质泥粉晶云岩,强烈的去云化作用,约占 25%~30%,少量残余晶间孔,低孔低渗

1) 泥微晶白云岩:低孔低渗储层,物性差,储集空间以微裂隙和微孔隙为主。毛管压力曲线总体表现为“排驱压力高,中值半径小,分选性中等,细歪度,退出效率低”等特征。

2) 微粉晶白云岩:中高孔、中渗储层,物性较好,储集空间晶间(溶)孔为主,镜下溶孔发育,连通性较好,分布较均匀。毛管压力曲线总体表现为“平台特征明显,排驱压力较低,大孔为主(孔径 > 10 μm),分选性中等,进汞饱和度较高,有效连通孔隙体积占比较大”

等特征。

3) 藻凝块(藻团块)白云岩:中高孔、中低渗储层,物性较好,储集空间以藻格架孔、粒间(溶)孔为主,裂缝-孔隙型次之。毛管压力曲线总体表现为“排驱压力较低,中值半径较小,分选性中等,进汞饱和度中等”等特征。毛管压力曲线分为两类:孔隙型和双重介质型。

4) 藻球粒(藻砂屑)白云岩:中孔、中低渗储层,物性一般,储集空间以藻格架孔、粒间(溶)孔和微孔隙

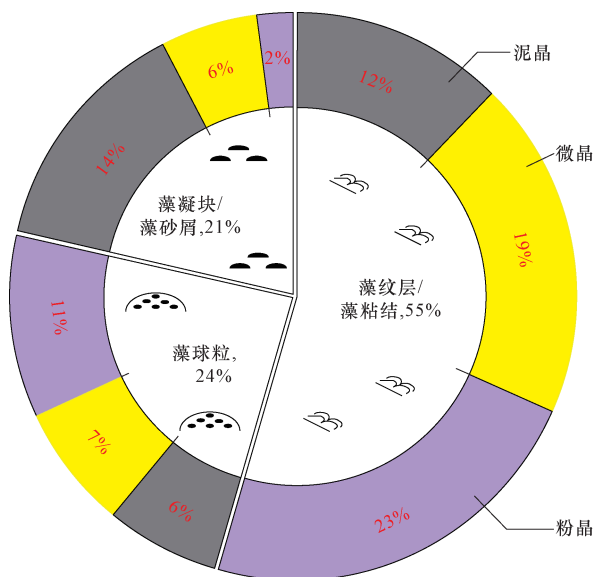


图3 川西马鞍塘剖面雷四段残余藻结构白云石粒度大小统计

Fig.3 Statistics of grain size for residual dolomites with algal texture in the Lei 4 member, seen from the Ma'antang outcrop in Western Sichuan

为主。毛管压力曲线总体表现为“排驱压力高,中值半径小,分选性中等,退出效率差异大”等特征。毛管压力曲线分为两类:孔隙型和双重介质型。

5)藻纹层(藻粘结)白云岩:中高孔、中高渗储层,物性最好,储集空间以藻格架孔、晶间(溶)孔为主,镜下溶孔发育,连通性较好,分布较均匀。毛管压力曲线总体表现为“平台特征明显,排驱压力低,大孔为主(孔径 $>10\mu\text{m}$),分选性较好,进汞饱和度高,有效连通孔隙体积占比较大”等特征。其中,藻纹层(藻粘结)结构的粉晶白云岩微I类储层。

2.2 致密隔层划分

基于纳米尺度的盖层全孔隙联合测定是将压汞法和气体吸附法相结合,利用有限盖层样品的实测排替压力、渗透率、孔隙度、比表面积及微孔隙结构等微观封闭性参数来评价盖层封堵油气能力的一种方法,也可以用来评价相对致密性储层或隔层。

实测结果表明,当孔径集中范围小于 20nm 时,可以作为油气的隔层(致密层)。PZ1井的 5814.42m 为含灰泥晶白云岩,白云石大小为半自形曲直面镶嵌($p-s$), $5\sim 10\mu\text{m}$,整体不发光(CL); 5822.40m 为残余藻球粒泥晶灰岩,暗红至不发光(CL);实测的孔径集中范围为 $2\sim 20\text{nm}$,毛管压力曲线呈平直端点陡降型(图6),为致密性隔层的特征,这与测井解释为气层

的隔层相吻合。

2.3 孔隙类型及孔渗关系

不同类型白云岩的物性变化较大,PZ1、YS1和SYS1井的238件物性统计表明:泥微晶白云岩(9件)平均孔隙度为 0.98% ($0.07\%\sim 2.07\%$),平均渗透率为 $0.352\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ($0.001\times 10^{-3}\sim 2.910\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);微粉晶白云岩(29件)平均孔隙度为 5.61% ($0.83\%\sim 14.38\%$),平均渗透率为 $1.369\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ($0.004\times 10^{-3}\sim 7.681\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);藻凝块白云岩(37件)平均孔隙度为 3.65% ($1.07\%\sim 10.71\%$),平均渗透率为 $3.582\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ($0.004\times 10^{-3}\sim 26.300\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);藻球粒白云岩(72件)平均孔隙度为 4.46% ($0.65\%\sim 13.01\%$),平均渗透率为 $5.205\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ($0.002\times 10^{-3}\sim 147\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);藻纹层白云岩(91件)平均孔隙度为 5.99% ($1.07\%\sim 20.21\%$),平均渗透率为 $19.28\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ($0.003\times 10^{-3}\sim 710\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)。从孔隙度-渗透率的关系图(图7)可见:可划分3个区间:①孔隙度和渗透率呈正相关,主要为孔隙型储集体;②孔隙度小于 2% ,但渗透率变化较大,又可细分为2个区间,小于 $0.01\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,相对致密岩性或微孔隙发育层;样品渗透率为 $0.1\times 10^{-3}\sim 200\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 为微孔隙-裂隙型;③过渡型(介于①至②),为裂隙-孔隙型或孔隙-裂隙型;值得一提的是,几乎未见高孔低渗储集样本,与图2较为吻合,总体上反映孔隙的连通性相对较好(即纵向非均质性弱)、或胶结和充填作用相对较弱,或微裂隙相对发育;储层物性受较为连续的向上变浅的米级旋回、潮坪与潟湖下大量藻纹层-叠层石沉积结构、早期大规模白云化作用等影响。

3 储集体评价及分布

3.1 初步评价

根据罗蛰潭等(1981)以及上述雷四上亚段储层中岩相(性)与孔隙类型、结构等关系,尤其是发育藻结构、微孔隙等特征,初步划分出4级,其主要参数及特征如下(表3)。受岩石类型、层序界面、裂隙发育等因素影响,参数边界可重叠。

3.2 纵向分布

综上所述,残余藻结构白云岩有利于孔隙发育。若按雷四上亚段中的4个小层分层,统计表明:从上到下,藻纹层含量逐渐增加(图8)。

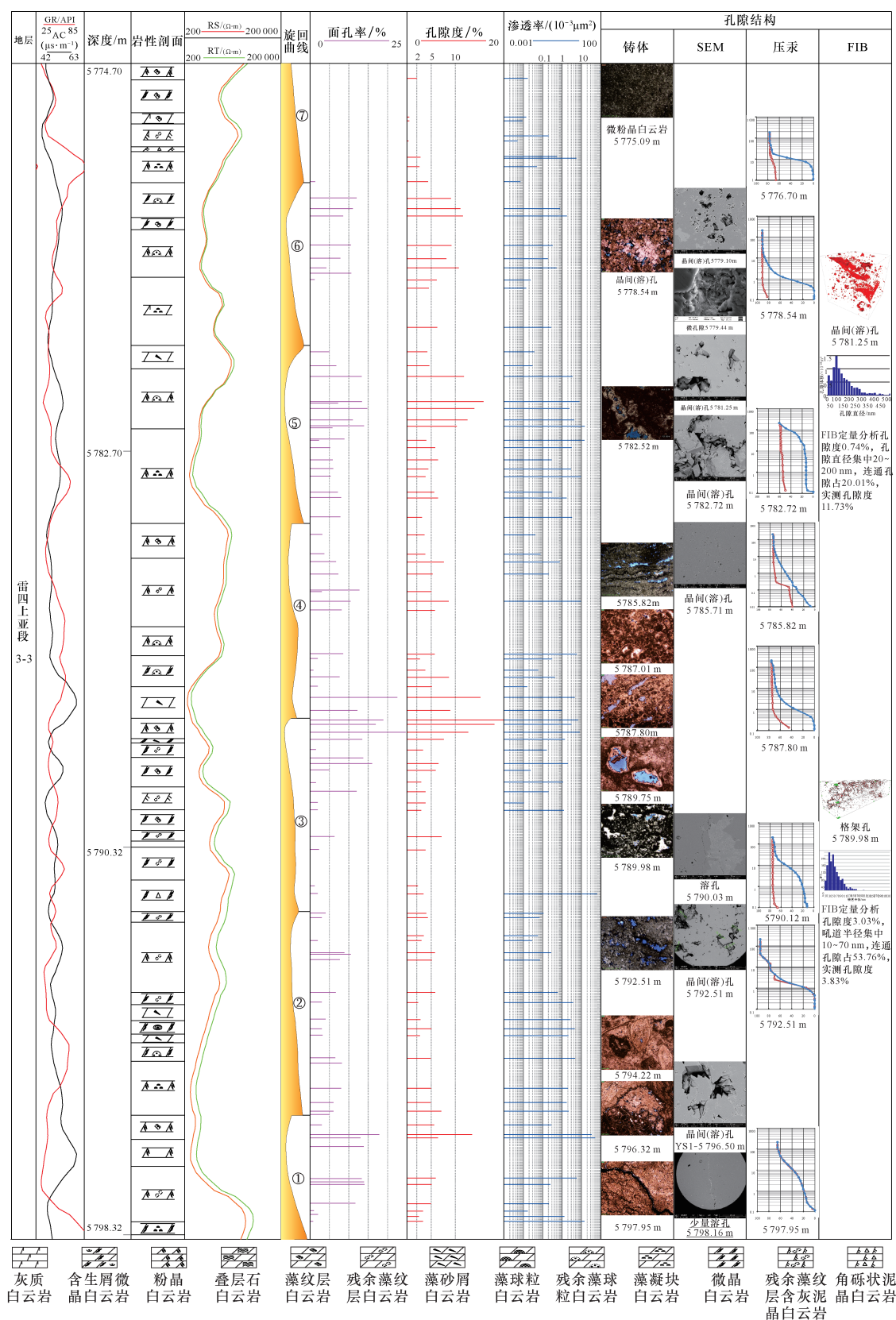


图4 彭州气田 YS1 井雷四段部分取心段(6-8 回次)岩性、

孔隙类型、物性及测井响应(孔隙度、渗透率及压汞资料均来自中国石化西南油气分公司)

Fig. 4 A diagram exhibiting the lithology, pore types, physical properties and well - logging responses for the cored interval (6 - 8 roundtrips) in the Lei 4 member in Well YS1 in Pengzhou gas field (data of porosity, permeability and high pressure mercury injection (HPMI) are the courtesy of Southwest Oil and Gas Branch of SINOPEC)

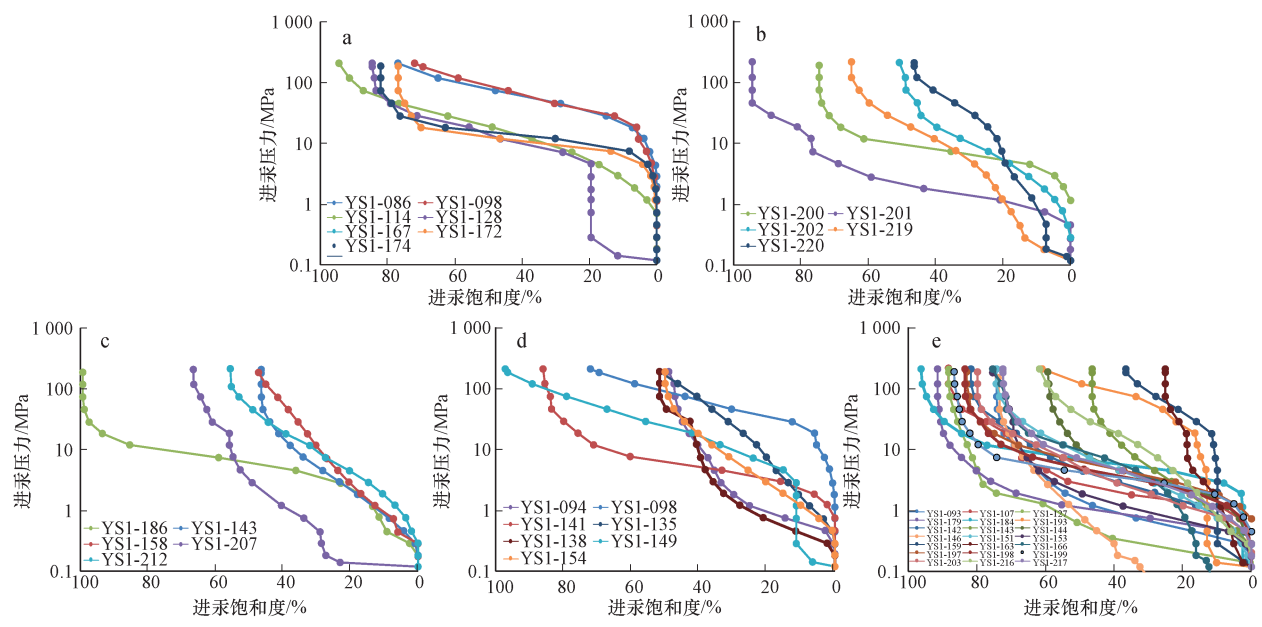


图 5 彭州气田 YS1 井不同类型白云岩毛管压力曲线

Fig. 5 The capillary pressure curves for various dolomites sampled from Well YS1 in Pengzhou gas field

a. 泥微晶白云岩; b. 微粉晶白云岩; c. 藻凝块(藻团块)白云岩; d. 藻球粒(藻砂屑)白云岩; e. 藻纹层(藻粘结)白云岩

表 2 彭州气田 YS1 井不同藻结构白云岩、泥粉晶及粉晶云岩孔隙表征参数

Table 2 Characterization parameters for pores of dolomites with various microbial textures and silty-micritic and micritic dolomites sampled from Well YS1 in Pengzhou gas field

岩石类型	储集空间	孔隙结构	排驱压力/MPa	孔喉半径/ μm	孔隙度/%	渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$
泥微晶白云岩	微裂隙和微孔隙	纳米孔喉, 连通性差	$\frac{0.14 \sim 4.34}{1.90(7)}$	$\frac{0.17 \sim 5.23}{1.10(7)}$	$\frac{1.08 \sim 3.70}{2.32(7)}$	$\frac{0.004 \sim 0.542}{0.106(6)}$
微粉晶白云岩	晶间(溶)孔	大孔喉, 连通性好	$\frac{0.18 \sim 1.93}{0.63(5)}$	$\frac{0.38 \sim 5.32}{2.62(5)}$	$\frac{2.46 \sim 5.77}{3.94(5)}$	$\frac{0.070 \sim 14.100}{3.156(5)}$
藻凝块(藻团块)白云岩	(藻)格架孔、粒间(溶)孔	亚微米孔喉, 连通性一般	$\frac{0.14 \sim 0.45}{0.32(5)}$	$\frac{1.62 \sim 5.31}{2.75(5)}$	$\frac{2.63 \sim 7.61}{5.61(5)}$	$\frac{0.030 \sim 2.120}{0.913(5)}$
藻球粒(藻砂屑)白云岩	(藻)格架孔、粒间(溶)孔和微孔隙	亚微米孔喉, 连通性一般	$\frac{0.14 \sim 1.79}{0.66(7)}$	$\frac{0.41 \sim 5.23}{2.1(7)}$	$\frac{2.66 \sim 8.89}{5.68(7)}$	$\frac{0.004 \sim 1.520}{0.491(7)}$
藻纹层藻粘结白云岩	(藻)格架孔晶间(溶孔)	大孔喉, 连通性好	$\frac{0.07 \sim 1.15}{0.32(21)}$	$\frac{0.64 \sim 103.58}{10.82(21)}$	$\frac{2.19 \sim 15.13}{6.15(21)}$	$\frac{0.056 \sim 10.300}{1.133(20)}$

注:表中数值为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

为进一步弄清不同藻结构白云岩(岩相)、孔隙类型与结构、物性以及包括 GR、RT、RS 和 AC 等测井响应,以 YS1 井第 6 至第 8 回次取心(5 772.00~5 796.00 m)为例,综合了铸体片中的孔隙统计、扫描电镜、微米 CT、聚焦离子束显微技术-FIB 及定量表征技术(压汞、盖层全孔隙联合测定)等多种方法,集中展示了岩相(性)、宏观到微观不同尺度下孔隙特征及测井参数间的关联性(图 4)^[19]。

由图 4,有以下几点认识:①高 GR、低电阻或高 AC 值,往往对应于孔隙-裂隙发育层段;②较低电阻及深浅测向电阻差别大时,一般对应较好的孔隙发育带;③孔隙发育带-似乎呈米级旋回的变化,近顶部-中上部往往发育高孔渗带,中、下部有可能出现孔渗相对差一些的差储层段或隔层;④面孔率大小与孔渗性对应呈线性相关,反映出雷四下亚段储层以孔隙型储层为主。

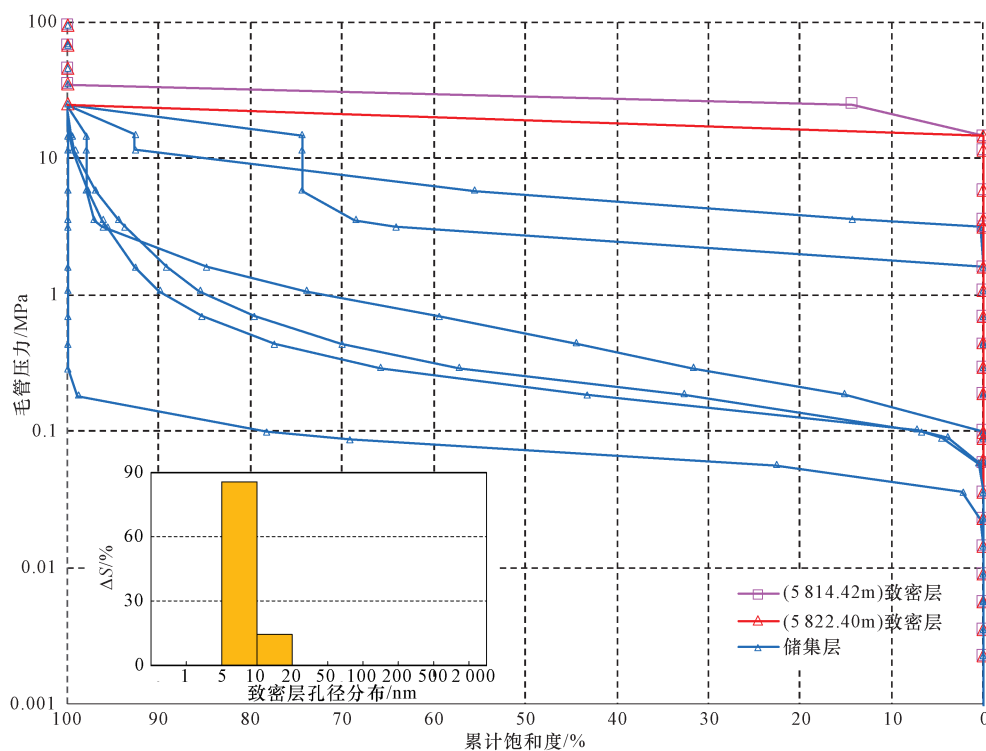
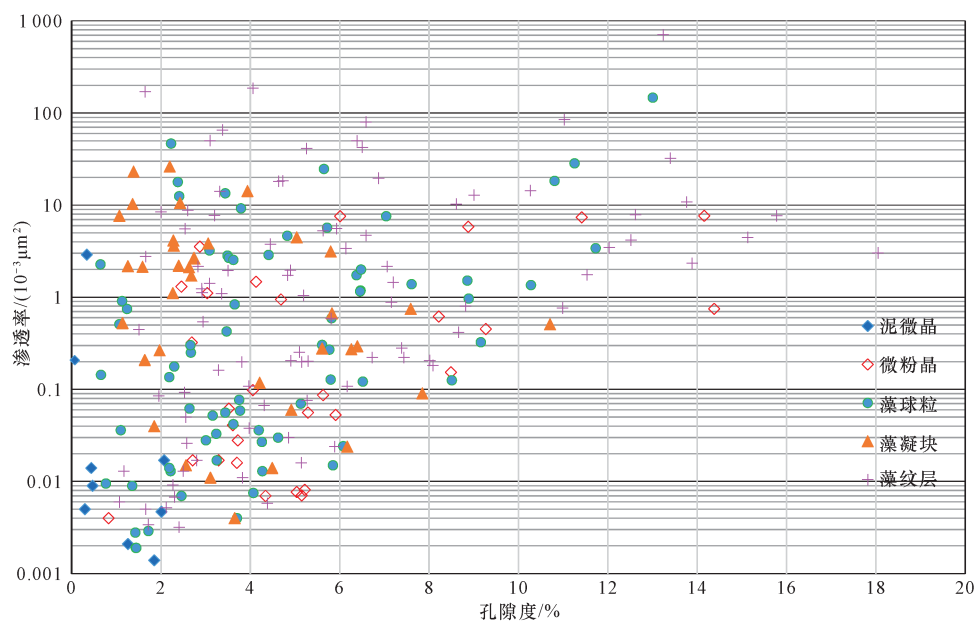


图6 彭州气田 PZ1 井储层孔径分布与毛管压力关系

Fig. 6 The correlation of pore distribution and capillary pressure of reservoirs in Well PZ1 in Pengzhou gas field

图7 彭州气田中三叠统雷四上亚段取心段样品孔隙度与渗透率关系 ($n = 238$)Fig. 7 The correlation of porosity and permeability for the cored interval from the upper Lei 4 member of the Middle Triassic in Pengzhou gas field ($n = 238$)

4 成因探讨

彭州气田雷四上亚段各小段的岩性、孔隙类型及其占比是孔隙成因直接指示。以 PZ1 井的取

心段为例,组构性溶蚀包括了:生物扰动-钻孔-潜穴 BO-BU、微生物藻菌有关溶孔(格架孔、窗格孔和微孔隙等)及晶间孔(溶)^[20-27];非组构溶孔包括少量扩溶缝洞、窗格孔洞、渗流砂或裂隙(表4)。

表 3 彭州气田中三叠统雷四上亚段岩性、孔隙类型、物性参数及储集体评价

Table 3 The reservoir assessment in terms of lithology ,pore type and physical property for the upper Lei 4 member of the Middle Triassic in Pengzhou gas field

储层分类	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ(致密层)
孔隙度/%	>10	10~5	5~2	<2
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	>5	5~0.1	0.1~0.01	<0.01
平均孔喉半径/μm	>0.3	0.3~0.1	0.1~0.05	<0.05
主要岩石类型	藻纹层-球粒、叠层石云岩、藻纹层-藻粘结云岩及藻砂屑(凝块)云岩、粉细晶云岩	藻球粒-藻纹层-藻粘结云岩、粉(细)晶云岩、藻凝块云岩、藻砂屑(凝块)云岩	残余藻球粒(或纹层)(含灰)泥粉晶云岩、砂屑(凝块)-藻粘结云岩、含灰粉晶云岩	含灰(膏)泥(粉)晶云岩、含云的泥晶灰岩或藻粘结灰岩、含云的生屑泥晶灰岩
孔隙类型	窗格(扩)溶孔洞、藻格架孔、溶孔洞、粒内溶孔、晶间(溶)孔及裂隙、扩溶缝、角砾状溶孔	晶间(溶)孔、窗格(扩溶)孔、粒内(间)孔、溶孔(洞)、残留孔隙、微裂隙、扩溶缝	晶间孔、粒内孔(微孔隙)、窗格孔、角砾状孔、微裂隙、铸模孔、扩溶缝、残余孔	晶(粒)间孔、粒间(内)孔、微孔隙
其他特征	无或较弱的胶结、油斑或油迹	白云石、方解石胶结或充填等、少量油斑	去云化、白云石、方解石胶结或充填等	微生物矿化、白云岩化、去云化、石膏胶结

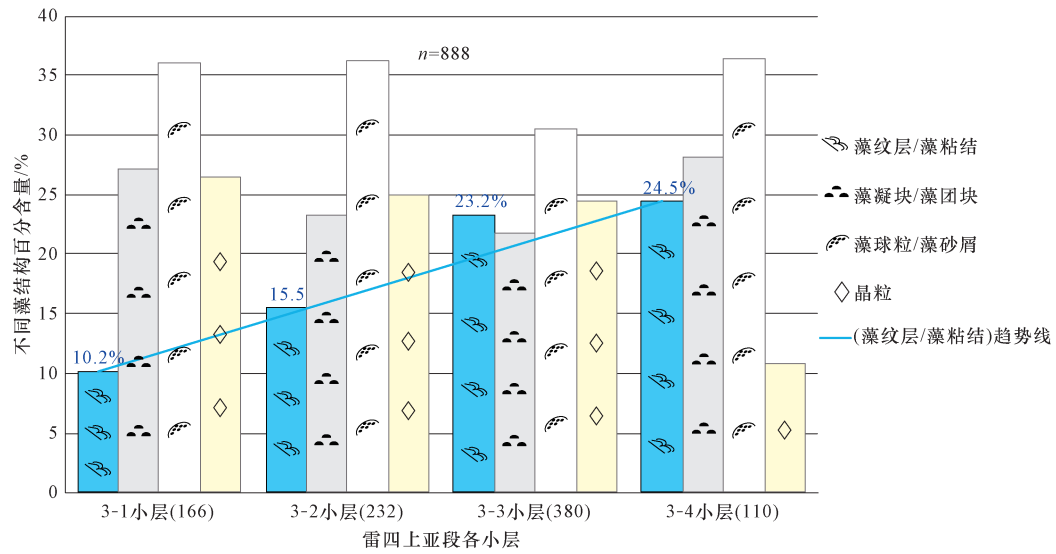


图 8 彭州气田 PZ1 - YS1 - SYS1 井的雷四上亚段中的不同残余藻结构的白云岩分层统计

Fig. 8 Statistics of the composition of dolomites with various residual microbial textures in different intervals in the upper Lei 4 member in Wells PZ1,YS1 and SYS1 in Pengzhou gas field

从表 3 中可见,雷四上亚段的 3-1 小层,位于开阔台地中的丘席或台内滩的储集体一般至较差,储集空间为藻有关的组构孔(微孔隙)、非组构溶缝;3-2 小层为局限台地的潮下上部至潮间浅带(SMF18,21),云化相对较发育,藻窗格孔-藻溶孔及白云石晶间(溶)孔发育;受局限海-咸水区发育的潮坪带的纹层状藻粘结白云岩、白云石化和早期成岩作用的控制;3-3 小层中基本同上,但粉晶白云岩或粉细晶白云岩中晶间孔及溶孔占重要的比例,反映出渗流回流白云岩促进孔隙的发育^[13]。

雷四上亚段存在台缘的微生物礁丘、局限台地、潮坪和蒸发潟湖等沉积,成岩过程可能经历了以下 4 个

阶段:①早期成岩作用;②浅埋藏成岩作用;③与断裂相关大气淡水作用;④中深埋藏成岩作用。

其中,早期沉积-成岩作用可能对孔隙演化起重要的作用。其中,泥晶套、泥晶化颗粒、泥晶壳、凝块(图 2d,g,i)、等厚纤状环边(图 2f)以及低(镁)镁方解石存在^[13]等标志的海底胶结作用;渗流粉砂、粒状镶嵌胶结物、铸模孔、膏模孔(及膏溶孔洞)、粒间(内)孔、伴生的去云化、去膏化及部分硅化(图 2l)、与藻纹层等有关组构孔(图 2a,b)、部分非组构孔洞(图 2b,d)或微孔隙-微裂隙等(图 2c,k,h)代表了大气水渗、潜流带成岩作用(图 9a—d);有序度低、泥粉晶、残余藻结构发育的准同生期云化(图 2b,b)或泥粉

表4 彭州气田PZ1井取心段岩性、微相与沉积旋回、成岩作用及孔隙发育和物性关系

Table 4 The lithology, microfacies, depositional cycle, and diagenesis of the cored interval, and the correlation of pore development and physical property in Well PZ1 in Pengzhou gas field

埋深/m	层段	主要岩性	微相与旋回	成岩作用(胶结类型及比例)	不同类型孔隙比例	实测物性
5 763.95 ~ 5 767.77	T_2l^4 (3-1)	有孔虫球粒-砂屑-核形石灰岩	SMF18, 21,13	C0-C I (1%~15%)、剩余孔隙1%~2%、溶缝孔5%~10% (C I-C II) 全部胶结,缝合线白云化(1%~3%),微裂隙孔隙1%~2%	溶缝 31%, BC-IP16%, 藻溶孔 53% ($n=19$)	孔隙度<2%,个别样品达4%,渗透率 $<0.1 \times 10^{-3} \mu m^2$
5 808.00 ~ 5 815.30	T_2l^4 (3-2)	砂屑-球粒-叠层石白云质灰岩 残余藻球粒-粉晶-泥晶白云岩、灰质白云岩	向上变深, SMF11,16, 21,19	泥晶套 雾心亮边、去白云化、偶含硬石膏、扩溶缝	溶缝 17%, MO+FE (7.0%), BC-IP27%, 藻溶孔 27.6% ($n=29$)	孔隙度为2%~5%,渗透率介于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu m^2$
5 817.80 ~ 5 821.00	T_2l^4 (3-3)	粉晶-凝块-球粒-微晶与凝块白云岩夹薄层残余藻球粒灰质白云岩	2个向上变深,SMF17,13	非组构扩溶缝洞、FE、渗流砂		孔隙度部分大于5%,渗透率介于 $0.1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu m^2$
5 821.60 ~ 5 825.80	T_2l^4 (3-4)	砂屑-凝块-球粒-泥晶白云岩	向上变浅, SMF16	棘皮(纤状C00+粒状C01;10%)-巨晶CII(20%~30%),云化50%~60%(5 821.88 m),溶孔(C I)+裂隙C I (10%)(5 822.95 m)	溶缝 18.8%, MO+FE (8.3%), BC-IP41.7%, 藻溶孔 31.25% ($n=29$)	孔隙度为2%~3%,渗透率介于 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu m^2$
5 825.80 ~ 5 828.80		含生屑球粒-凝块-粉晶-砂屑灰质白云岩	向上变深	砂屑-凝块(纤状-粒状C00-C01,10%),溶孔C I (5%~8%),MO (1%~2%);FE5%~8%,CI,扩溶孔,泡沫状,FE3%~5%(C I 1%~2%胶结)		
		粉晶-泥粉晶-粉细晶白云岩	强白云化, SMF18	晶间孔、晶间溶孔、微裂隙		孔隙度为2%~5%,渗透率介于 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu m^2$

注:C0.泥晶方解石;C00.生屑泥晶方解石;C01.泥晶核形石方解石;C I.第I期方解石胶结物(海水或混合水);C II.第II期方解石胶结物(早期大气淡水);BC.粒间(溶)孔;IP.晶间(溶)孔;MO.铸模孔;FE.窗格孔。

晶、粉细晶蒸发-渗透回流白云岩化(图2a—e, g, h;图9a, b)、以干燥-炎热-超盐度-碱性介质下^[13]的硬化粪球粒、微生物球粒、粘土有机质(或矿物)、钙质蓝细菌-EPS作用遗迹(球状、哑铃状、杆状等)的存在及与微生物、粘土及有机酸的相互矿物作用,藻纹层-叠层石中帐篷构造及纵张裂隙(图2h, k);随后的浅埋藏条件下,少量液态烃类充注或经细菌作用转变为沥青,而在藻礁滩有关的粒间溶蚀孔洞或晶洞中可依次见到犬牙状-等厚刃状胶结、微生物微晶胶结、烃类以及不同环境下胶结与充填物(图9c, d)。

除了早期成岩作用外,彭州气田雷四上亚段储集体经历了包括了埋藏成岩中的压实与压溶作用、交代白云岩化、重结晶、多种类型矿物胶结充填作用、以及有机-无机相互作用等,如孔洞中发育少量鞍形白云石(YS1-134井,埋深5 793.52 m, $T_h=162.0 \sim 170.5^\circ\text{C}$)和石英

($T_h=107.6 \sim 180.0^\circ\text{C}$, 平均 140.4°C , $n=161$);盐度平均13.21%(5.41%~16.89%, $n=36$)(YS1-186井,埋深6 216.22 m, YS1-030, 5 760.18 m和PZ1-008, 5 836.95 m);更多地,对孔隙保存起破坏性的影响,但埋藏早期的有机-无机相互作用,即微生物、粘土及有机酸作用的溶解作用及烃类的侵位阻止了胶结-充填沉淀,使组构性或非组构的孔隙得以保存,而多期的构造裂隙显然改善了其渗透性,有关的构造-流体作用(包括大气淡水)对孔隙的影响需要更详细的研究工作。

5 结论

1) 彭州气田雷四上亚段储集空间分为:沉积-早期成岩组构溶蚀孔洞、成岩期组构-非组构溶蚀孔洞、构造裂隙及非组构溶蚀孔洞及微孔隙(D)等4种类型。

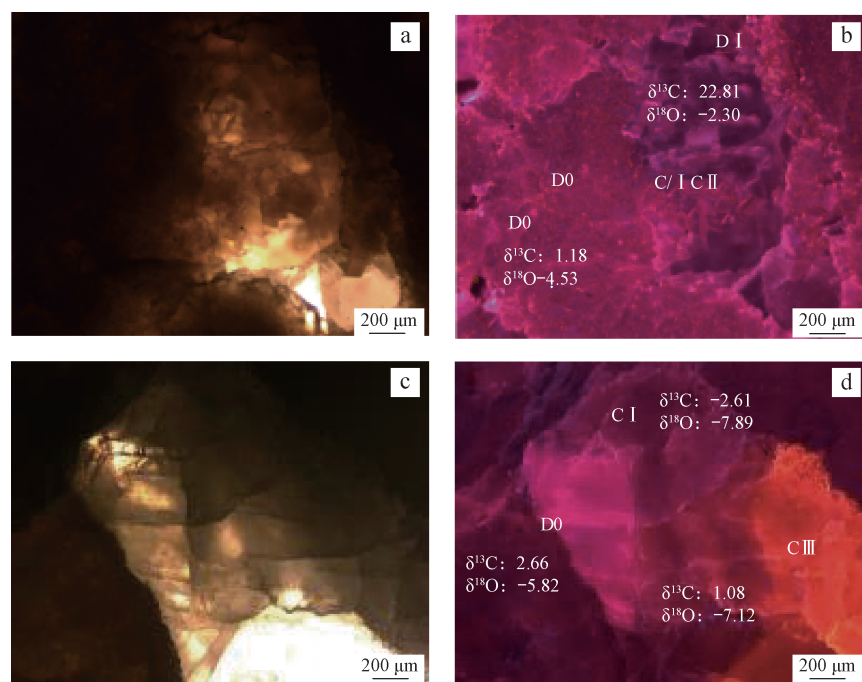


图9 彭州气田微生物岩储层中凝块白云岩2个世代白云石及孔洞中2期方解石充填CL及微区的同位素值

Fig. 9 The cathodoluminescence images and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ sampling by microdrill for the two generations of dolomites and two periods of calcites in thrombolite – microbial rocks in Pengzhou gas field

a,b. SYS1井,埋深6 197.93 m,含棘皮凝块岩,橙紫红 – 中等紫红色白云石 D0 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 1.18‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -4.53‰),暗紫色 D I ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -2.81‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 2.30‰),不发光 C I 粗晶方解石;c,d. YS1井,埋深5789.12m,残余藻球粒 – 藻纹层 – 凝块石云岩,粒状 D0 发均匀中等或暗紫红色 CL, $\delta^{13}\text{C}$ 为 2.66‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -5.82‰;大气淡水作用的不发光 C I (δ^{13} 为 -2.61‰, δ^{18} 为 -7.89‰)和埋藏的发亮艳橙黄红色 C III 粗晶方解石 (δ^{13} 为 1.08‰, δ^{18} 为 -7.12‰)

2) 孔隙度大小与残余藻结构的类型相关,与白云石晶粒的大小呈正相关;从藻凝块(藻团块) – 藻球粒(藻砂屑) – 藻纹层(叠层石),从泥晶 – 微晶 – 粉晶,孔隙度呈增大趋势。

3) 按不同岩性(相)、孔隙类型以及孔隙度、渗透率及平均孔喉半径大小,初步划分出4类储集体。

4) 有利微生物岩发育的干燥 – 炎热、超盐度、碱性沉积环境、向上变浅的米级旋回的中上部往往发育高孔渗带,早期快速的渗透回流白云岩化、大气淡水作用、烃类充注及多期构造裂隙对孔隙发育 – 保存起重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 曾德铭. 川西北地区中三叠统雷口坡组储层研究[D]. 成都:西南石油学院,2005:15 – 45.
Zeng Deming. Reservoir study of the Leikoupo Formation of Middle Triassic in northwest Sichuan Province[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2005: 15 – 45.
- [2] 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 Qiongxiang, 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.
- [3] 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.
Gao Hengyi, Deng Meizhou, Li Yong, et al. Diagenesis and reservoir characteristics in the Middle Triassic Lei-4 Member of Leikoupo Formation in Pengzhou area of western Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(1): 37 – 46.
- [4] 刘树根,孙玮,宋金民,等. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探的关键地质问题[J]. 天然气地球科学,2019,30(2):151 – 167.
Liu Shugen, Sun Wei, Song Jinmin, et al. The key geological problems of natural gas exploration in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(2): 151 – 167.
- [5] 孙伟. 龙门山前雷口坡组储层孔隙结构特征及开发评价意义探讨[J]. 地球科学前沿,2018,8(2):318 – 330.
Sun Wei. Pore structure characteristics and significance of development evaluation of Leikoupo Formation reservoir in Longmen Mountain Front[J]. Advances in Geosciences, 2018, 8(2): 318 – 330.
- [6] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates[J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(2):207 – 250.
- [7] Lucia F J. Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(9):1275 – 1300.
- [8] Hollis C, Vahrenkamp V, Tull S, et al. Pore system characterisation in heterogeneous carbonates: An alternative approach to widely used rock-typing methodologies[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(4):772 – 793.

- [9] 赵新伟,许红. 基于微焦 X-CT 的碳酸盐岩孔隙结构的精细表征[J]. 特种油气藏,2016,23(1):127-131.
Zhao Xinwei,Xu Hong. Microfocus X-CT based fine characterization of carbonate pore texture[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016,23(1):127-131.
- [10] Saller AH,Henderson N. Distribution of porosity and permeability in platform dolomites Insight from the Permian of West Texas-Reply[J]. AAPG Bulletin,2001,85(3):530-532
- [11] 刘宏,谭秀成,李凌,等. 孔隙型碳酸盐岩储集层特征及主控因素——以川西南嘉陵江组嘉5段为例[J]. 石油勘探与开发,2011,38(6):651-663.
Liu Hong,Tan Xiucheng,Li Ling, et al. Characteristics and main controlling factors of porous carbonate reservoirs: A case from the Jia 5 Member of the Jialingjiang Formation, southwest Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2011,38(6):651-663.
- [12] Sibley D F,Gregg J M. Classification of dolomite rocks textures[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1987,57:967-975.
- [13] 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 member 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.
- [14] 田英姿,陈克复. 用压汞法和氮吸附法测定孔径分布及比表面积[J]. 中国造纸,2004,23(4):21-23.
Tian Yingzi,Chen Kefu. Determination of pore size distribution and surface area of several materials using mercury porosimetry and gas adsorption[J]. China Pulp & Paper,2004,23(4):21-23.
- [15] 秦瑞宝,李雄炎,刘春成,等. 碳酸盐岩储层孔隙结构的影响因素与储层参数的定量评价[J]. 地学前缘,2015,22(1):251-259.
Qin Ruibao,Li Xiongyan,Liu Chuncheng, et al. Influential factors of pore structure and quantitative evaluation of reservoir parameters in carbonate reservoirs[J]. Earth Science Frontiers,2015,22(1):251-259.
- [16] 郭振华,李光辉,吴蕾,等. 碳酸盐岩储层孔隙结构评价方法——以土库曼斯坦阿姆河右岸气田为例[J]. 石油学报,2011,32(3):459-465.
Guo Zhenhua,Li Guanghui,Wu Lei, et al. Pore texture evaluation of carbonate reservoirs in Gasfield A, Turkmenistan[J]. Acta Petrologica Sinica,2011,32(3):459-465.
- [17] Ndiamihaja S,Padmanabhan E,Ben-Awuah J,等. 静态条件下碳酸盐岩三维孔隙网络的溶蚀改造及其对孔隙结构的影响[J]. 石油勘探与开发,2019,46(2):361-369.
Ndiamihaja S,Padmanabhan E,Ben-Awuah J, et al. Static dissolution-induced 3D pore network modification and its impact on critical pore attributes of carbonate rocks[J]. Petroleum Exploration and Development,2019,46(2):361-369.
- [18] 颜其彬,陈明江,汪娟,等. 碳酸盐岩储层渗透率与孔隙度、喉道半径的关系[J]. 天然气工业,2015,35(6):30-36.
Yan Qibin,Chen Mingjiang,Wang Juan, et al. Correlation among permeability, porosity and pore throat radius of carbonate reservoirs[J]. Natural Gas Industry,2015,35(6):30-36.
- [19] 张翔,张伟,靳秀菊,等. 普光地区碳酸盐岩储层孔隙类型测井识别及孔渗关系[J]. 地球科学,2016,41(12):2019-2026.
Zhang Xiang,Zhang Wei,Jin Xiuju, et al. Identification of pore types and study of poroperm relationships based on logging data in Puguang carbonate reservoir[J]. Earth Science,2016,41(12):2019-2026.
- [20] 屈海洲,周子坤,张云峰,等. 微生物碳酸盐岩孔隙研究进展[J]. 沉积学报,2018,36(4):651-663.
Qu Haizhou,Zhou Zikun,Zhang Yunfeng, et al. Research progress of porosity in microbial carbonates[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018,36(4):651-663.
- [21] 王龙,Khalid L,Muhammad R,等. 微生物碳酸盐岩的成因、分类以及问题与展望——来自华北地台寒武系微生物碳酸盐岩研究的启示[J]. 地球科学进展,2018,33(10):1005-1023.
Wang Long,Khalid L,Muhammad R, et al. The genesis, classification, problems and prospects of microbial carbonates: Implications from the Cambrian carbonate of North China Platform[J]. Advances in Earth Science,2018,33(10):1005-1023.
- [22] Hip K,Haas J,Poros Z, et al. Dolomitization of Triassic microbial mat deposits (Hungary): Origin of microcrystalline dolomite[J]. Sedimentary Geology,2015,318:113-129.
- [23] 吕修祥,陈佩佩,陈坤,等. 深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例[J]. 石油与天然气地质,2019,40(5):957-971.
Lyu Xiuxiang,Chen Peipei,Chen Kun, et al. Effects of differential diagenesis of deep carbonate rocks on hydrocarbon zonation and accumulation: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology,2019,40(5):957-971.
- [24] 王鸣川,段太忠,杜秀娟,等. 沉积相耦合岩石物理类型的孔隙型碳酸盐岩油藏建模方法[J]. 石油实验地质,2018,40(2):253-259.
Wang Mingchuan, Duan Taizhong, Du Xiujuan, et al. Geological modeling method based on sedimentary facies coupled rock type for porous carbonate reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018,40(2):253-259.
- [25] 刘宇坤,何生,何治亮,等. 碳酸盐岩超压岩石物理模拟实验及超压预测理论模型[J]. 石油与天然气地质,2019,40(4):716-724.
Liu Yukun,He Sheng,He Zhiliang, et al. The rock physics modeling experiment under overpressure and theoretical model for overpressure prediction in carbonate rocks[J]. Oil & Gas Geology,2019,40(4):716-724.
- [26] 王义武,蒋飞虎,慕小水,等. 湖相碳酸盐岩成因及其石油地质意义:以东濮凹陷沙河街组四段为例[J]. 断块油气田,2018,25(5):568-572.
Wang Yiwu,Jiang Feihu,Mu Xiaoshui, et al. Origin of lacustrine carbonate rocks and its significance to petroleum geology: taking fourth Member of Shahejie Formation in Dongpu Sag as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field,2018,25(5):568-572.
- [27] 赫俊民,王小垚,孙建芳,等. 塔里木盆地塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质,2019,40(5):1022-1030.
Hao Junmin,Wang Xiaoyao,Sun Jianfang, et al. Characteristics and main controlling factors of natural fractures in the Lower-to-Middle Ordovician carbonate reservoirs in Tahe area, Northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology,2019,40(5):1022-1030.