

四川盆地东北部中三叠统雷口坡组四段优质储层发育特征及勘探方向

段金宝,金民东,范志伟,朱祥,刘雁婷

(中国石化勘探分公司,四川成都610041)

摘要:为进一步扩大四川盆地东北部地区雷口坡组四段浅滩叠合岩溶型储层探井成功率,实现高效勘探开发。基于区内丰富的钻井、取心和室内分析测试资料,对雷口坡组四段(雷四段)储层基本特征和主控因素进行了综合分析。结果表明:①研究区雷四段属于砂屑滩沉积,储层主要发育于砂屑云岩和岩溶角砾岩中,储集空间类型以溶洞和裂缝为主,储层非均质性较强。②储层主控因素分析认为,潮坪相浅滩发育的原始孔渗系统为优质储层的发育提供了物质基础;岩溶作用叠加改善形成大量有效的储集空间,是储层发育的关键;埋藏期热液溶蚀作用进一步提高储渗性能。③岩溶作用具有特殊的机械充填和化学作用识别标志,不同岩溶地貌单元下岩溶水性质和活动规律的差异最终决定了储层发育质量。川东北地区岩溶丘台侧向近源及断裂叠合发育区是下一步有利勘探方向。

关键词:岩溶作用;热液溶蚀作用;浅滩;储层特征;三叠系;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and favorable plays for high-quality reservoirs in the Middle Triassic Lei 4 Member, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

Duan Jinbao, Jin Mindong, Fan Zhiwei, Zhu Xiang, Liu Yanting

(Exploration Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: For the purpose of further enhancing the success rate of exploratory wells emplaced in the superposed shallow-karst reservoirs in the 4th member of Leikoupo Formation (hereinafter referred to as Lei 4 Member) to achieve efficient exploration and development in northeastern Sichuan, we comprehensively analyze the reservoir characteristics and major control factors based on rich data from borehole observation, coring and lab analysis. The results show that (1) the Lei 4 Member in the study area is of intraclastic grainstone shoal facies with reservoirs mainly developed in the dolarenite and karst breccia; and the dominant reservoir space is karst caverns and fractures, featuring relatively strong heterogeneity. (2) The analysis of the reservoir genetic mechanism shows that the original pore system of the shoals of tidal flat facies serves as the material basis for high-quality reservoir development. A mass of reservoir space formed by the transformation of karstification is a factor critical for the reservoir development. Thermal dissolution in the burial stage could further improve the reservoir quality. (3) The karstification shows identification markers special to mechanical filling and chemical reaction, and the property of karst fluid and its activity routines in the different karst geomorphic units serve to determine the reservoir quality. The karst mound-platform, which is near source rock laterally and/or has well-developed fracture system, is a desirable zone for future exploration in the northeastern Sichuan Basin.

Key words: karstification, thermal dissolution, shallow, reservoir characteristics, Triassic, Yuanba area, Sichuan Basin

中三叠统雷口坡组是四川盆地最早开采天然气和盐卤的层系之一,盆地内先后探明开发了川东卧龙河构

造雷口坡组一段(雷一段)气藏、川西北中坝构造雷三段气藏和川中磨溪构造雷一段气藏,这些气藏均为一套潮

收稿日期:2020-10-12;修订日期:2021-06-25。

第一作者简介:段金宝(1981—),男,研究员,沉积储层学。E-mail:duanjb.ktnf@sinopec.com。

基金项目:石化联合基金项目(U19B6003);“十三五”国家科技攻关重大专项(2017ZX05005-003)。

坪相浅滩储层控制下的岩性气藏^[1-3],且集中发育于雷一段—雷三段。近年来,随着油气勘探的不断深入,在川东北元坝和龙岗等地区雷口坡组顶部也相继发现了一套高产工业气层。但从所获得的实钻资料来看,这套气层与川西和川中雷口坡组气藏表现出明显的差异性,储层横向非均质性极强。以元坝地区为例,YB4井、YB2井和YB22井在雷四段测获高产气流,而相临近的YB204井和YB3井等却仅见有较弱的油气显示。鉴于此,本文以元坝地区雷四段为研究对象,从储层基本岩石学特征、储集空间类型和物性特征出发,结合配套分析化验资料,深入分析探讨这套储层成因及主控因素。研究结果可为该层系下一步勘探提供依据。

1 区域地质背景

研究区地理位置位于四川省广元市苍溪县一带(图1)。中三叠统雷口坡组沉积时期该地区为上扬子克拉通稳定碳酸盐台地沉积,且由于该时期处于印支运动的初始阶段,全球发生与构造运动相对应的海平面下降^[4],一方面研究区由开阔的陆表海环境逐渐演化为受限的陆表海环境,发育一套以局限—蒸发台地相白云岩、膏质白云岩和石膏为主的碳酸盐岩;另一方面,中三叠世末期,印支I幕运动使地层抬升并遭受剥蚀,上三叠统须家河组陆源碎屑沉积直接覆于中三叠

统雷口坡组(安尼阶)之上,形成不整合。不整合面缺失以灰岩沉积为主的中三叠统黄莲桥组、上三叠统马鞍塘组(即天井山群)和垮洪洞组,时间间断至少约20~26 Ma。雷口坡组顶部长期经受风化壳淋滤改造,具有发育不整合岩溶储层的有利条件^[5-7]。

研究区钻井资料分析揭示,雷口坡组区域上分为4段,其中雷四段遭遇不同程度剥蚀。元坝地区雷四段残留厚度较大,为155~270 m。按照岩性和岩相特征,元坝地区雷四段又可细分为一和二两个亚段,雷四二亚段岩性主要为灰白色石膏岩、膏质白云岩夹泥微晶白云岩,厚80~215 m。雷四一亚段岩性主要为微晶白云岩、砂屑白云岩和角砾云岩,夹薄层的微晶灰岩和砂屑微晶灰岩,厚31~88 m,为主要的储层发育段(图2)。从沉积微相来看,研究区可以分为膏质潟湖、云质潟湖、砂屑滩、灰云坪和云泥坪5种沉积微相,其中膏质和云质潟湖微相岩性为膏岩、白云质膏岩及膏质白云岩的岩石组合。石膏岩产状有两种,其一呈层状,层厚较薄,多为毫米级,局部可达数厘米,色淡,其二呈层状或板状分散于白云岩中,这两个微相主要分布于研究区以南平原地—阆中市一带。灰云坪和云泥坪为台坪沉积,常见泥晶云岩、灰质白云岩和泥质白云岩岩性组合,主要分布于研究区以北及东部剑阁—通江—巴中地区。砂屑滩相为台内高能沉积,环绕潟湖发育,岩性上由含砂屑云岩、微亮晶砂屑云岩和亮晶砂屑云岩组成。砂屑滩为研究区

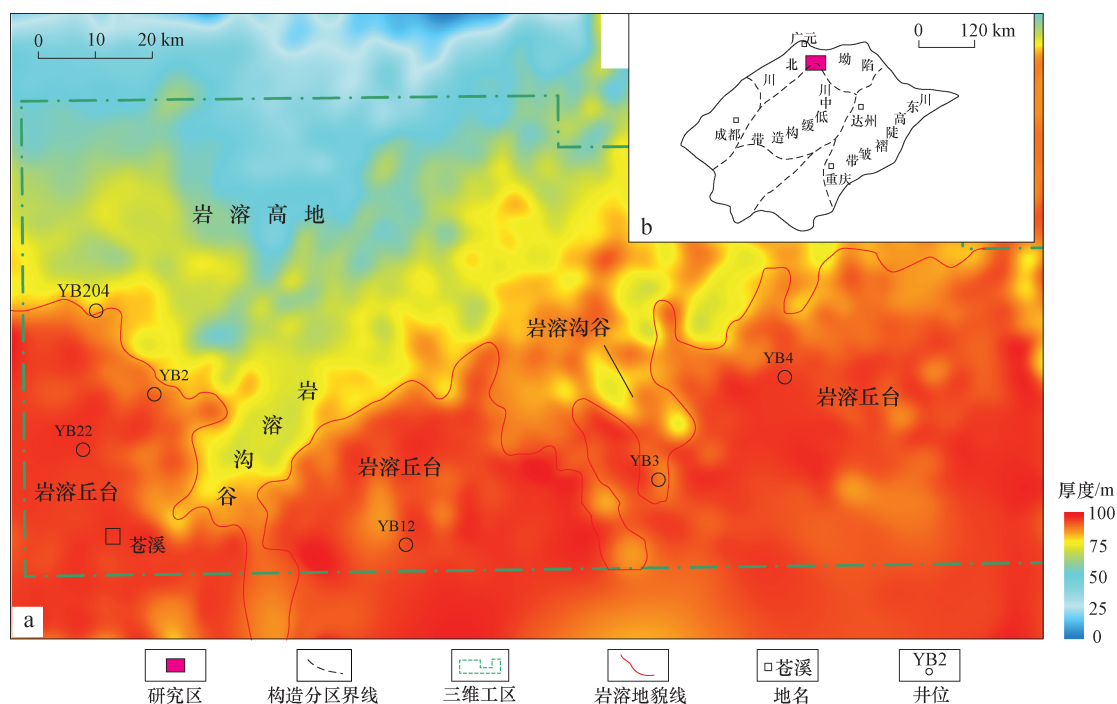


图1 四川盆地元坝地区雷口坡组岩溶地貌单元划分(a)和研究区位置(b)

Fig. 1 Karst topography units of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Yuanba area (a) and location of the study area (b), Sichuan Basin

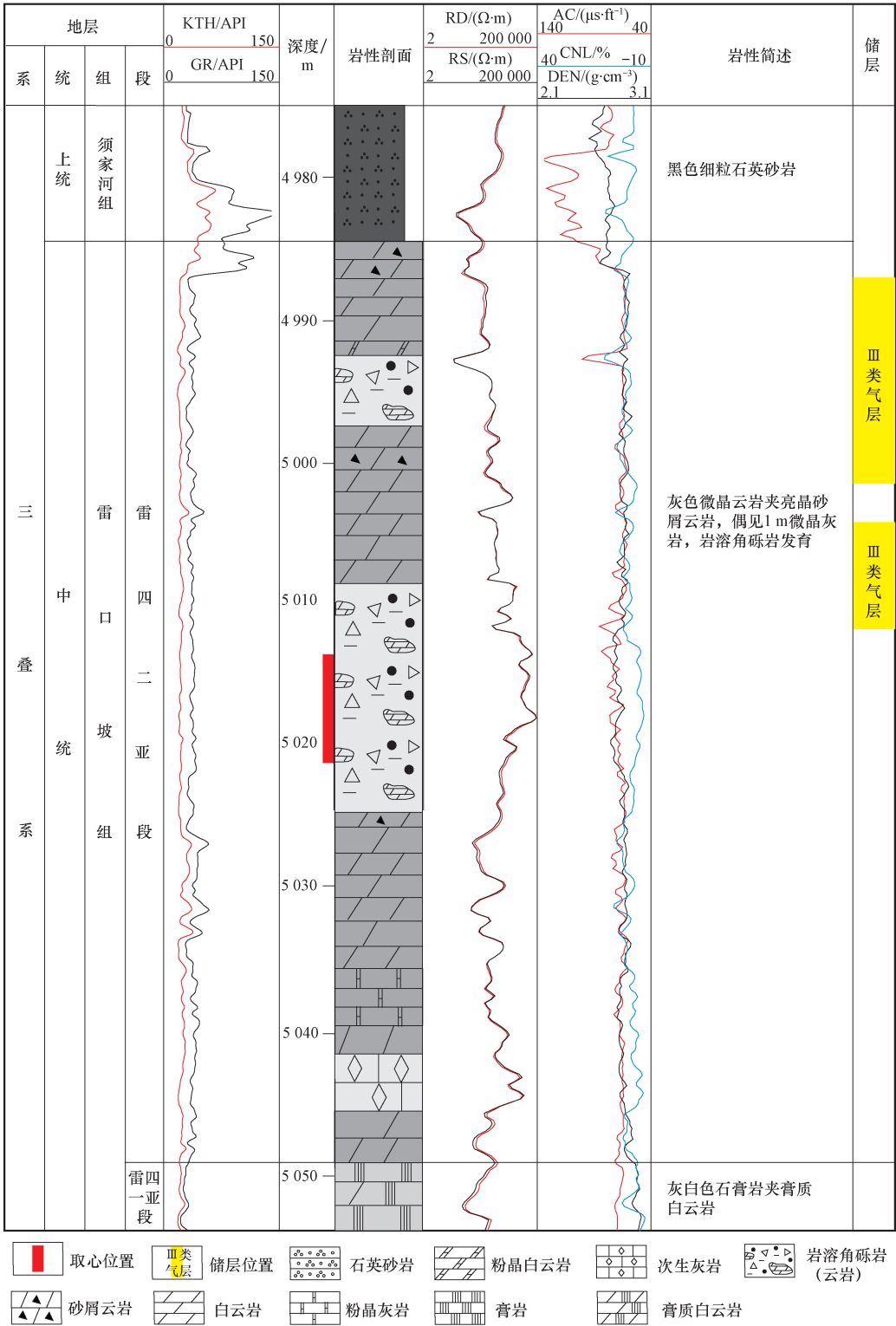


图 2 四川盆地元坝地区 YB4 井雷四二亚段综合柱状图

Fig. 2 Composite column of the 2nd submember of the Lei 4 Member in Well YB4 in Yuanba area, Sichuan Basin

内优势沉积相,取心上多发育晶间孔及溶孔。

2 储层特征

对于储集层特征的准确描述有助于研究储集层形

成机理,评价储集层质量^[8-10]。川东北地区雷四段沉积后经历了多期成岩作用的差异改造,不同区块和层段呈现出不同的储集空间类型组合特征,从而控制了储集层质量^[11]。通过对研究区丰富的钻井和取心资料分析,认为雷四段储层主要为与岩溶作用相关的角

砾岩类和与高能滩相关的颗粒岩类。

2.1 岩石学特征

2.1.1 与高能滩相沉积相关的砂屑云岩类

沉积相带的分异使元坝地区雷四段还发育砂屑云岩类储层,这类储层受岩溶作用改造相对较弱,而更能反映出雷四段原始沉积物储集性能,砂屑云岩在个别井局部层段分布,颜色以灰-深灰色为主,单层厚度变化极大,1~6 m不等,砂屑含量为60%~90%,粒径为0.2~2.0 mm,以0.3~1.0 mm居多,分选和磨圆中等-好,粒间充填物以亮晶胶结物为主(图3a,b)。由于分选和磨圆性好,岩心颜色较为单一,主要发育在潮下高能滩体,宏观岩心上储集空间主要为针孔。

2.1.2 与岩溶作用相关的角砾岩类

川北地区雷口坡组受印支 I 幕构造运动抬升剥

蚀,强烈的岩溶作用使雷四段中上部发育大量的岩溶角砾岩储层,角砾类型多样,按照成分可分为云质角砾岩和灰质角砾岩,前者占绝对优势。角砾通常呈砂砾级,岩心上可见较大砾级为2.0~5.0 cm,较小为0.3~0.5 cm(图3c—e)。角砾成分单一,与原岩一致,主要以粉晶白云岩和砂屑白云岩为主。角砾分选、磨圆较差,以棱角状-次棱角状为主,部分角砾局部被溶圆(图3f)。颗粒支撑、基质支撑和基质-颗粒支撑均有,也见一些角砾大小不等,充填于更大的角砾之间,部分角砾可以拼接。角砾之间往往存在渗流粉砂、粘土或被后期方解石胶结。

灰质角砾岩与云质角砾岩具有明显的相似性,所不同的是灰质角砾岩角砾成分主要为微晶灰岩和粉晶灰岩(图3g—i)。由于雷口坡组主要为蒸发-局限台地沉积环境,因而灰质角砾岩储层发育的频率要明显低于云质角砾岩。

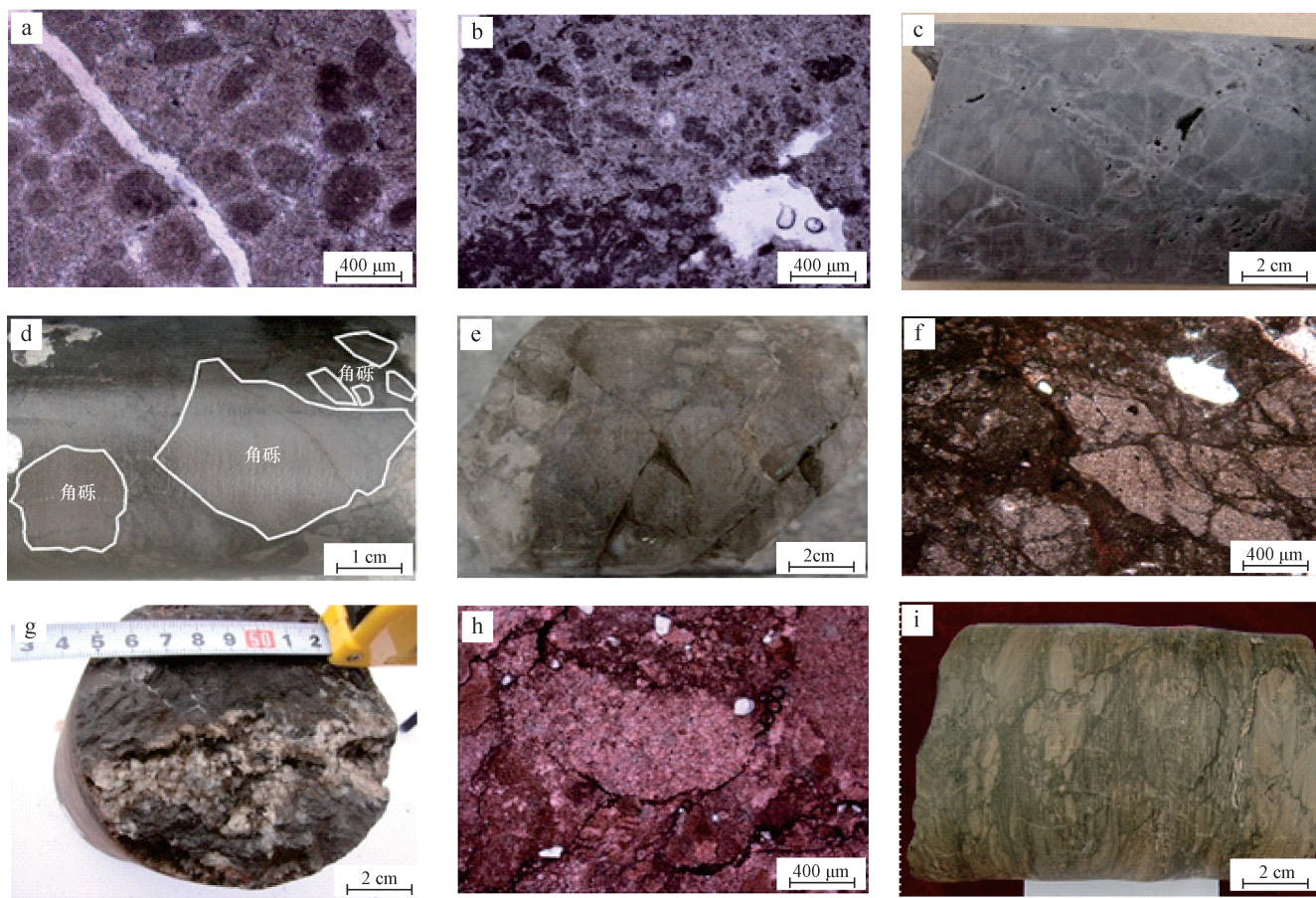


图3 四川盆地元坝地区雷四段储层岩石学特征

Fig. 3 Petrological features of the Lei 4 Member reservoirs in Yuanba area, Sichuan Basin

a. YB4 井,埋深 5 025.50 m,砂屑白云岩,SEM;b. YB12 井,埋深 4 656.00 m,亮晶砂屑云岩-溶蚀孔洞发育,SEM;c. YB12 井,埋深 4 657.04 m,微晶白云岩和角砾白云岩中的溶洞较发育,岩心;d. YB12 井,埋深 4 663.00 m,岩溶角砾岩,云质角砾呈棱角-次棱角状,大小不一,岩心;e. YB12 井,埋深 4 664.80 m,云质岩溶角砾岩,溶洞和裂缝发育,岩心;f. YB102,埋深 4 901.50 m,云质角砾岩,SEM;g. YB12 井,埋深 4 666.00 m,岩溶角砾岩,灰岩角砾,岩心;h. YB204 井,埋深 4 870.82 m,岩溶角砾岩,砾石成分为粉晶灰岩、见陆源砂,SEM;i. YB4 井,埋深 5 019.06 m,灰质岩溶角砾岩,岩心

2.2 储集空间特征

四川盆地雷口坡组沉积成岩后的 200 Ma 间先后经历了印支、燕山和喜马拉雅 3 次大地构造运动,多期次复杂成岩作用的叠合改造,使元坝地区雷四段呈现出多样化的储集空间面貌^[12-13]。根据形成机理和形态表征的差异,将元坝地区雷四段二亚段储层储集空间分为孔隙、溶洞及裂缝 3 大类。

2.2.1 孔隙

根据形成方式将雷四二亚段孔隙划分为原生孔隙和次生孔隙两大类。原生孔隙与岩石本身形成时间一致,主要分为残余粒间孔(图 4a)和残余晶间孔。原生孔隙未完全被胶结物充填,也未经后期溶蚀扩大改造,所保留下来的孔隙即为残余孔隙。由于绝大多数原生粒间孔均会经过后期溶蚀改造,所以原生孔隙在元坝地区发育较少。次生孔隙是指沉积物形成之后,受各种成岩作用(主要为岩溶作用等)改造而成的孔隙,主要是在原生孔隙的基础上再溶蚀扩大,如粒间溶孔以及晶间溶孔(图 4b)。研究区内孔隙类储集空间主要见于砂屑云岩中,因而相较于其他储集空间类型,孔隙发育频率相对较低。

2.2.2 溶洞

溶洞是元坝地区雷四段另一类重要的储集空间

类型,直径大于 2 mm 的孔隙都称为洞(图 4c, d)。溶洞一方面可以为早期孔隙系统的再溶蚀扩大,另一方面更多为受岩溶作用新形成的储集空间。研究区雷四段溶洞洞径一般为 0.5 ~ 1.0 cm,最大可达 5.0 cm。溶洞形态、边缘均极其不规则,部分溶洞由溶缝连通呈带状分布,溶洞内部半充填中-粗晶白云石(图 3d)、方解石和沥青(图 4d)以及渗流粉砂等物质。

2.2.3 裂缝

裂缝作为一种特殊类型的储集体,即可直接作为储集空间,亦可作为流体运移的渗滤通道。元坝地区裂缝产状以构造缝和溶蚀缝为主(图 4e, f),几种倾向不同的开启裂缝交织在一起,形成网状溶缝。在白云岩段, FMI 成像图上也可见大量的裂缝,同时在裂缝周围还发育有大量的溶蚀孔洞(图 4f),推测为溶蚀流体顺着裂缝进入已有孔隙,溶扩优化改善先期的孔渗体(同时裂缝自身也见溶扩现象)(图 4e),裂缝对溶蚀孔洞起到良好的沟通作用,最终形成有效的缝洞储集系统。部分溶缝被化学充填物(白云石和方解石)(图 4e)及机械充填物(黑色泥质、石英砂和少量的碳酸盐岩角砾)充填-半充填。裂缝是区内雷四段最发育、岩心中常见的储集类型之一,是碳酸盐岩储层油气运移的良好通道及储集场所。

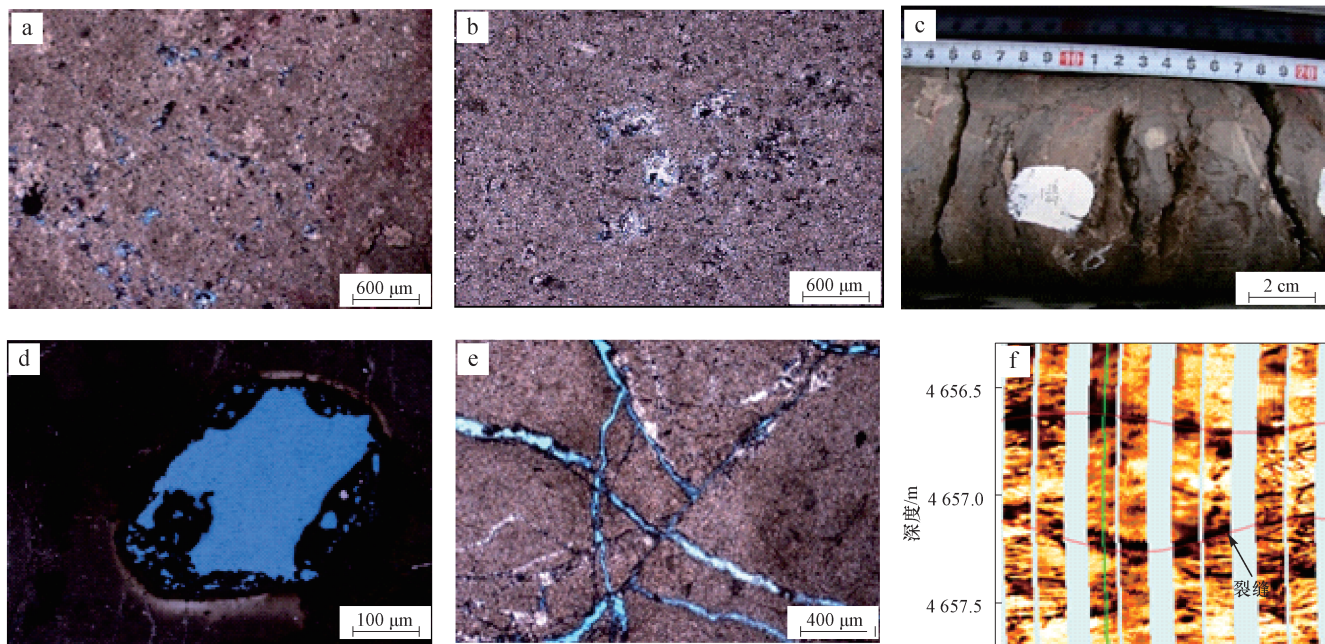


图4 四川盆地元坝地区雷四段储集空间类型

Fig. 4 Reservoir space types of the Lei 4 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. YB12 井,埋深 4 657.59 m,砂屑微晶云岩,剩余原生粒间孔, SEM; b. YB12 井,埋深 4 660.94 m,粉晶云岩,晶间溶孔, SEM; c. YB12 井,埋深 4 658.82 m,溶洞,岩心; d. YB12 井,埋深 4 663.00 m,溶洞,部分充填黑色胶结物, SEM; e. YB12 井,埋深 4 657.14 m,网状溶缝(未充填/半充填), SEM; f. YB12 井,埋深 4 656.50 ~ 4 657.50 m,成像测井,显示裂缝与溶蚀孔洞交织发育

2.3 物性特征

物性参数是储集性能最直接的体现,可以直接明确储集岩的储渗能力^[14-15],研究区多样化的储集空间形态各异、大小悬殊,因而导致储层的非均质性较强。从取心样品分析来看,雷四段储层具有较好的物性特征,小样样品氦气孔隙度最大 7.95%,最小 1.19%,平均值 3.15%(表 1);其中孔隙度大于 2.00% 的样品占总样品的 84.21%,主要集中分布于 2.00%~5.00%。渗透率最大值为 $313.944\ 7\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,最小值为 $0.001\ 2\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,并主要分布于 $0.002\times 10^{-3}\sim 10.000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。因此,总体上,雷四二亚段储层为低孔-低渗和中孔-低渗储层。而结合孔-渗关系散点图来看(图 5),大约一半储层孔-渗样品具有较好的正相关性;而另外一半样品孔隙度分布在 2.00%~4.00%,但渗透率却较高,说明该部分储层内裂缝十分发育。综合分析雷四二亚段储层以裂缝-孔洞型储层为主,其中微裂缝的沟通作用较大。

3 储层发育主控因素

3.1 潮坪相浅滩沉积是储层发育的基础

中三叠世末期,区域性海平面下降使四川盆地雷

口坡组演化为局限-蒸发台地沉积环境,从前述储层表征来看,经历了多期复杂成岩作用改造后,仍存在与原始高能相带相关的砂屑白云岩储层,表明浅滩相带仍是储层发育的主要控制因素之一。而从元坝地区储层纵向展布来看,储层集中发育于雷四二亚段中、上部-顶部,这也与沉积期高部位相关,高部位浅滩水体能量更强,波浪淘洗和冲刷作用使高部位浅滩具有更多的原始孔-渗系统,这些孔-渗系统一方面可直接保留下来,形成现今面貌的砂屑云岩储层,另一方面原岩的高孔渗性也有利于早期溶蚀流体的运移、交换及溶解物质的排出,形成大量的有效的储集空间,因而中、上部浅滩是储层发育的最有利层段。

3.2 不整合岩溶作用改造是储层形成的关键

川北地区雷口坡组沉积后,印支 I 幕构造运动使雷四段整体抬升暴露,强烈的岩溶作用一方面使地层发生剥蚀,如位于研究区北部的 YB204 井雷四一亚段残余厚度仅 31.0 m,而南部和西部的 YB12 井和 YB102 井残余厚度确分别达 86.5、89.5 m。另一方面,岩溶作用对潮坪相浅滩的溶蚀改造,形成大量的溶蚀孔洞,尽管有渗流粉砂、再埋藏期白云石、石英和方解石等充填,但仍然保留了较多的有效孔洞空间。这是雷四段优质储层形成的关键因素。

表 1 四川盆地元坝地区雷四段物性分析数据
Table 1 Statistics of the physical properties of the Lei 4 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

井名	深度/m	岩性	氦气孔隙度/%	平均渗透率/($10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)	沉积亚相
YB12	4 658.87	云质角砾岩,角砾成分主要为砂屑白云岩	7.95	32.631 1	颗粒滩
YB12	4 657.09	云质角砾岩,角砾成分主要为砂屑白云岩	6.01	3.041 0	颗粒滩
YB12	4 660.10	砂屑白云岩	4.88	0.008 0	颗粒滩
YB4	5 017.27	灰质白云岩	3.89	313.944 7	台坪
YB204	4 873.71	灰质白云岩	3.81	0.045 4	台坪
YB4	5 014.34	云质角砾岩,角砾成分主要为砂屑白云岩	3.43	0.001 2	颗粒滩
YB204	4 872.31	灰质白云岩	3.11	39.320 5	台坪
YB12	4 661.09	砂屑白云岩	2.96	0.004 1	颗粒滩
YB12	4 664.46	粉-泥晶藻屑白云岩	2.46	35.720 9	台坪
YB12	4 660.30	云质角砾岩,角砾成分主要为砂屑白云岩	2.45	0.323 4	颗粒滩
YB12	4 660.52	粉晶白云岩	2.39	0.601 0	台坪
YB4	5 016.73	粉晶白云岩	2.39	0.106 2	台坪
YB12	4 661.60	粉-泥晶藻屑白云岩	2.38	1.242 1	台坪
YB204	4 863.32	灰质白云岩	2.24	6.832 4	台坪
YB4	5 019.33	灰质白云岩	2.20	164.945 7	台坪
YB12	4 657.49	灰质角砾岩,角砾成分主要为砂屑灰岩	2.13	0.004 3	颗粒滩
YB4	5 020.03	粉晶残余藻屑白云岩	1.88	1.203 5	台坪
YB204	4 877.13	膏质白云岩	1.67	0.006 5	潟湖
YB204	4 875.87	膏质白云岩	1.19	0.002 9	潟湖

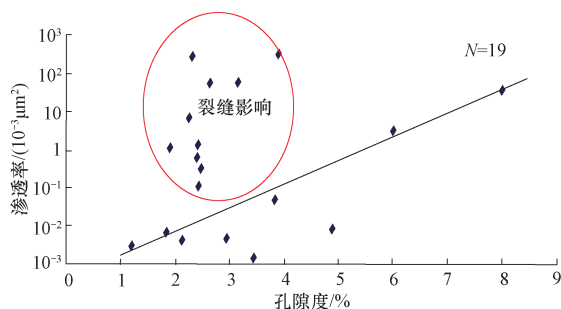


图5 四川盆地元坝地区雷四段储层孔-渗关系散点图

Fig. 5 Pores vs. permeability for the Lei 4 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

3.2.1 岩溶作用识别标志

油气勘探成果证明,世界上许多含油气盆地均发育有碳酸盐岩岩溶型含油气层(体)。据统计,世界油气的20%~30%是赋存在与不整合有关的风化壳岩溶型储层中,如墨西哥白垩纪戈尔登莱恩(Golden Lane)大油田,美国德克萨斯州二叠系圣安德烈斯(San Andres)组耶茨(Yates)油田等^[16-18]。对于元坝地区雷四段,风化壳岩溶影响尤为强烈,除见有明显的地层剥蚀和岩溶角砾等标志外,在岩石学、古生物和地球化学等方面还见有特殊的岩溶改造痕迹。

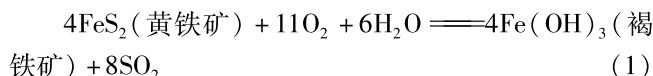
1) 岩溶作用机械充填识别标志

元坝地区雷口坡组风化壳岩溶最特殊的岩石学特征之一就是雷口坡组溶蚀形成的孔隙常被须家河组细粒石英粉砂和含氧化铁的粘土所充填(图6a—c)。在镜下根据粘土渗流物颜色的差异,可分为黄色与风化期产物相关的粘土和黑色与须家河组沉积相关的形成的渗流砂(图6a),阴极发光下,须家河组渗流砂中的石英发蓝色光、紫蓝色光、长石发粉红色光和暗绿色光(图6b),为陆源沉积的典型标志。进一步通过对这些黑色渗流粉砂内的矿物进行能谱分析,发现存在Ti和

Fe含量较高,正交光下呈明显黑色的钛铁矿(图7a—c)和Ba、C含量高,正交光下呈高级白干涉色的毒重石(图7a,d,e)。这些重矿物的存在与须家河组富含超稳定型重矿物沉积环境相关^[19],也是岩溶机械充填的特殊识别标志。另一方面,在雷口坡组顶部风化壳中,还发现属于上覆地层须家河组的古生物,元坝周缘MA201井黑色砂泥质充填物中炭屑还可见细胞结构。这些炭屑为须家河组地层沉积时,植物碎屑附存于溶蚀流体内沿溶蚀通道进入下伏雷口坡组形成的残余。

2) 岩溶作用化学识别标志

受构造运动的抬升,须家河组由埋藏阶段进入表生暴露溶蚀阶段,所处环境发生明显改变,因而也会发生与化学作用水岩反应相关的特殊变化。从元坝地区雷四段的常规镜下来看,发现了典型的去膏化(图8a)和去云化现象(图8b),这也是后期大气淡水淋滤环境的重要化学识别标志之一^[20]。同时从稳定矿物的转换来看,雷四—亚段见有星散状、浸染状、斑点状和斑块状褐铁矿[化学式为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{Fe}(\text{OH})_3$](图8c),分析认为由埋藏还原环境下形成的黄铁矿在大气淡水环境下经氧化转变成褐铁矿,其化学式为:



从雷四段不同岩性的地化特征分布来看(图9),受后期成岩作用改造较弱的泥晶灰岩、微晶云岩碳同位素值为-1.05‰~-0.12‰,均值为-0.54‰,与黄思静^[21]所研究的中三叠世四川盆地原始海水碳同位素值-1.00‰~4.20‰相当。而岩溶角砾岩类,及其内部脉体和充填物的碳同位素则相对于原始海水碳同位素值发生了明显负偏,表明这些样品成岩过程中受到大气淡水淋滤的显著影响。淡水淋滤通过土壤带溶解了

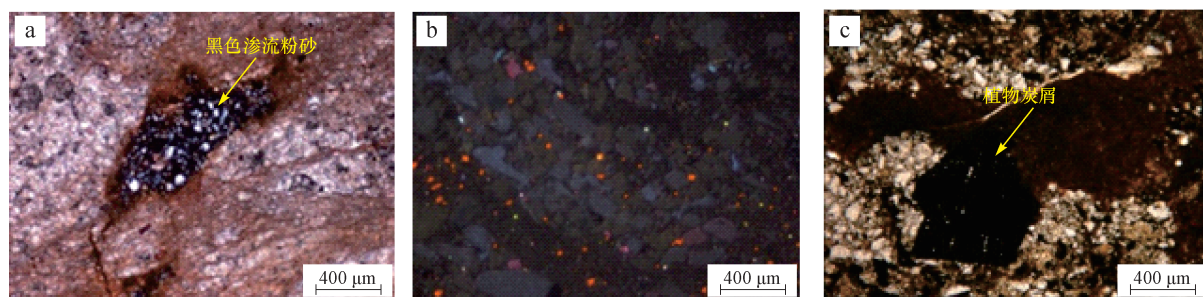


图6 四川盆地元坝地区雷四段岩溶作用机械充填识别标志

Fig. 6 Markers to identify mechanical filling under karstification in the Lei 4 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. YB12井,埋深4691.00m,晶云岩内溶孔粉砂充填物,SEM(+); b. MA201井,埋深3432.16m,含灰岩角砾砂泥质岩,灰岩不发光,石英发蓝色光、紫蓝色光,长石发粉红色光、暗绿色光,SEM; c. MA201井,埋深3437.30m,炭屑见植物细胞,SEM(-)

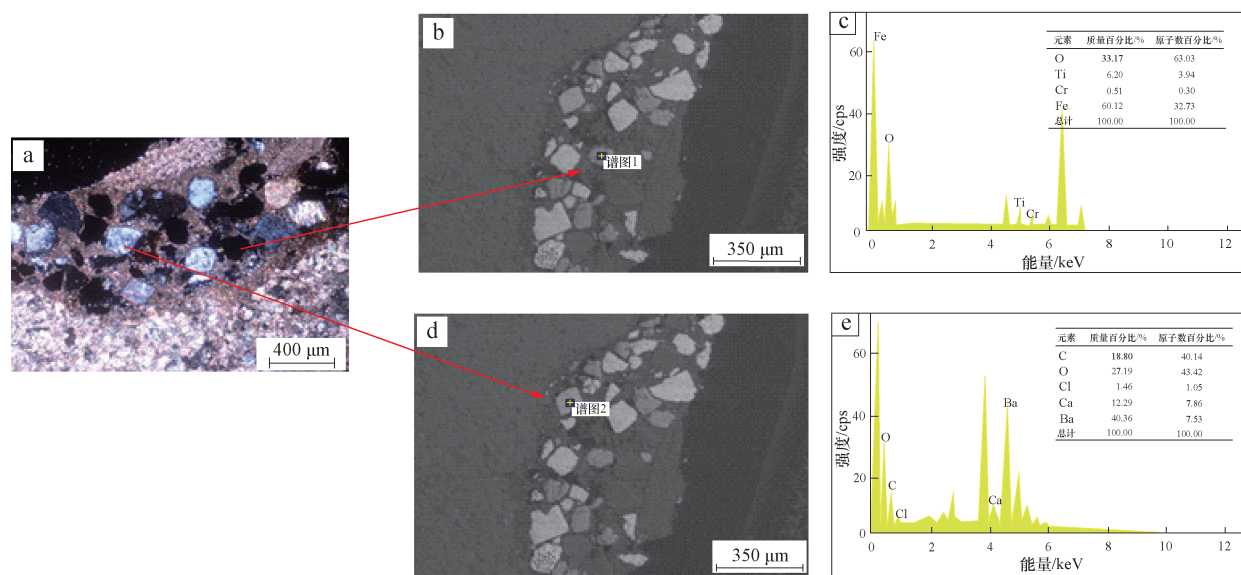


图 7 四川盆地元坝地区雷四段渗流物内重矿物扫描电镜-能谱分析

Fig. 7 The SEM-EDS of the heavy minerals in the seepage minerals in the Lei 4 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. YB204 井, 埋深 4 867 m, 重矿物黑色物质为钛铁矿, 高级白矿物为毒重石, SEM(-); b, c. 钛铁矿 SEM 及能谱分析; d, e. 毒重石 SEM 及能谱分析

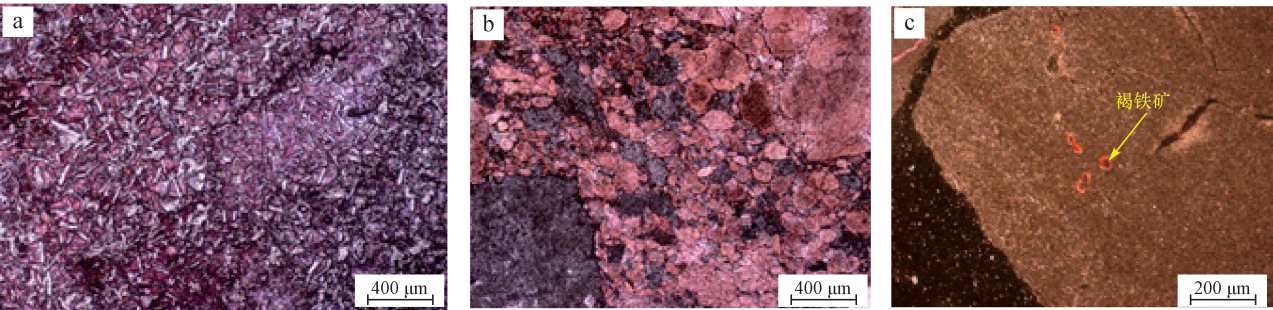


图 8 四川盆地元坝地区雷四段去石膏化、去云化及褐铁矿化特征

Fig. 8 Characteristics of degypsification, dedolomitisation, and ferritization in the Lei 4 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. YB2 井, 埋深 4 810.5 m, 白云石去石膏化微晶云岩, SEM(-); b. YB12 井, 埋深 4 715.0 m, 去云化次生灰岩, SEM; c. YB12 井, 埋深 4 663.0 m, 泥微晶白云岩内风化成因的溶孔内黄铁矿褐铁矿化(箭头指示), SEM

有机质氧化形成的 CO_2 , 有机质中含有大量的 $\delta^{12}\text{C}$, 富含 $\delta^{12}\text{C}$ 的水溶液与风化壳中海相环境中沉积的碳酸盐沉积物(岩)作用, 使其 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低, 这正是古风化壳碳酸盐岩的特点。同样, $\delta^{18}\text{O}$ 值的高低取决于成岩温度和孔隙水的盐度^[22], 孔隙水的盐度越低, 即淡水淋滤作用越强, $\delta^{18}\text{O}$ 值降低。从 $\delta^{18}\text{O}$ 分布来看, 与岩溶作用相关的样品相对于微晶云岩样品也发生了明显的负偏, 揭示了研究区强烈的岩溶作用背景。此外, 研究区白云石样品的电子探针分析 K_2O , Na_2O 和 SrO 含量均低, 表明受到大气淡水影响而导致 Na^+ , K^+ 和 Sr^{2+} 丢失(表 2)^[19]。

3.2.2 岩溶古地貌对储层分布的控制

前人的研究表明, 岩溶型储层的发育分布与岩溶

表 2 四川盆地元坝地区雷四段白云石电子探针元素分析

Table 2 Electron probe microanalysis of dolomite in the Lei 4 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

井号	埋深/ m	含量/%						
		Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	FeO	SrO	BaO
YB4	5 016.2	0	21.331	0	30.378	0.806	0.068	0
YB12	4 658.9	0	21.478	0	30.406	0.959	0.013	0
YB204	4 889.9	0	21.404	0.008	30.485	0.827	0	0

古地貌控制的古水文活动规律密切相关^[23-25], 由于雷四段顶部地层受地表河流冲刷剥蚀严重, 残留厚度明显减薄, 这些区域即为古溶沟的发育区。因而可用雷四二亚段的残留厚度来表征岩溶地貌(图 1)。溶沟的存在使元坝地区古地貌呈现沟台相间的特征, 在溶沟内部, 水体汇聚, 水势较低, 高部位丘台位置的溶蚀物

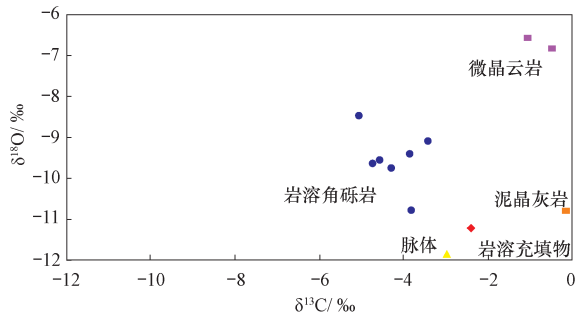


图 9 四川盆地元坝地区雷四段不同岩类碳、氧同位素特征
Fig.9 Features of carbon and oxygen isotopes of diverse rock types in the Lei 4 Member in Yuanba area,Sichuan Basin

质带至溶沟内堆积,故溶沟内的钻井多以垮塌和充填相为主,如 YB204 井和 YB3 井,这些井测井解释未见储层,油气显示微弱。而位于丘台主体区的钻井,地层残留厚度大,岩溶水势能强,饱和度低,溶蚀物质能及时带走排出,因而可见发育良好的储层,如 YB22 井和 YB4 井等井储层解释厚度分别为 46.5,22.9 m,测试产能则达 $36.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $68.37 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.3 深埋热液溶蚀作用进一步提高储渗性能

除表生溶蚀这一关键因素外,研究区雷四段还存在另一期建设性溶蚀作用—深埋热液溶蚀作用。一方

面从岩心和镜下可发现基岩中存在天青石(图 10a)、莹石和巨晶白云石等热液矿物脉体。另一方面也见有与热液溶蚀相关的溶洞。如在 YB12 井所发现的两个保存完好的与裂缝相连的两个溶洞(图 10b,c)。洞宽为 2~3 mm,长 1~3 mm,沿洞壁附着有黑色多孔凝胶状物质。在超高倍镜下凝胶状物质二次电子图像呈胶粒状结构,探明成分为富镁物质(尚未查明其矿物学特征)(图 10d)。同时,溶蚀洞内充填物成分从洞壁向外方向似有环带分异现象(图 10e,f)。缝、洞之外围岩中能谱分析存在大量中-低温热液标志矿物磁黄铁矿。据此认为这两个溶洞为热液溶蚀形成。热液溶蚀作用主要是对表生期形成的先期孔渗体的进一步叠加优化,在一定程度上提高储渗性能。

4 天然气地质意义

基于以上分析,认为元坝地区雷口坡组既有传统意义上优势,即浅滩相带叠合岩溶控制,又新发现热液作用叠加改造。从国、内外油气勘探实践来看(顺北油气田和耶茨油田等)^[16-17],岩溶作用除了与古地貌有关外,还受到断裂系统控制,由地表流体顺断裂系统向下溶蚀改造。而热液作用也与深部断裂有关,为热液

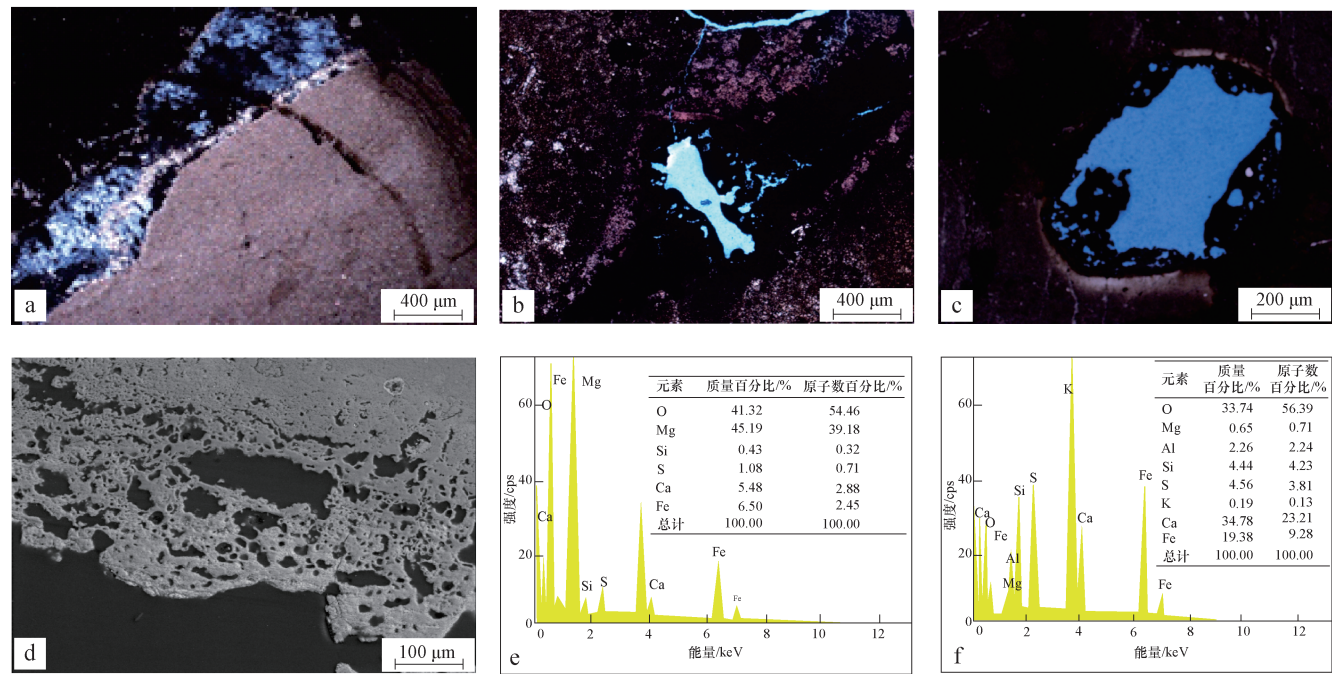


图 10 四川盆地元坝地区雷四段热液溶蚀特征

Fig.10 Features of thermal dissolution in the Lei 4 Member in Yuanba area,Sichuan Basin

a. YB5 井,埋深 4 912.50 m,泥晶云岩中天青石脉 4mm,SEM(+);b. YB12 井,埋深 4 664.17 m,与热液溶蚀相关的溶洞,内部充填黑色物质,SEM(-);c. YB12 井,埋深 4 663.00 m,与热液溶蚀相关的溶洞,内部充填黑色物质,SEM(-);d. 图 c 中黑色充填物,SEM;e. 黑色充填物能谱分析(1);f. 黑色充填物能谱分析(2)

流体沿断裂系统向上溶蚀改造,二者在断裂系统产生交集。因此,在进一步寻找优质储层过程中,需结合精细三维构造解释,在岩溶丘台高部位中寻找断裂系统发育区,一方面可沟通地表淡水或地腹热液流体改造,降低储层非均质性影响,另一方面断裂系统还可纵向沟通下伏下二叠统等多套海相地层烃源岩,有利于油气及时充注,汇聚成藏。

此外,从整个川东北地区雷四段岩性分布来看,通江-马路背地区亦大面积分布雷四段白云岩地层,且由于受到开江古隆起控制,该区域雷四段剥蚀作用强于元坝地区,易于形成丘台-沟谷相间分布的古地貌格局,沟谷内所沉积的上覆须家河组泥质烃源岩与雷口坡组形成侧生旁储有利源-储配置关系,同时由于该区域构造活动强烈,断裂系统也较为发育,具备良好的成储、成藏背景,是下一步寻找雷四段气藏的有利目标区。

5 结论

1) 川东北地区雷口坡组发育颗粒浅滩叠岩溶型储层,储集岩主要为岩溶角砾岩和砂屑云岩,储集空间以溶洞和裂缝为主,含部分粒间和晶间溶孔,储层整体发育质量较好,但非均质较强,为裂缝-孔洞型储层。

2) 除明显的地层剥蚀和岩溶角砾外,雷四段还见有黑色与须家河组沉积相关的渗流粉砂、重矿物及植物炭屑等岩溶机械充填识别标志和去膏化、去云化,以及磁铁矿褐铁矿化等岩溶化学作用识别标志。受大气淡水淋滤影响,碳、氧同位素相对于原始海水明显负偏,金属元素 Na^+ 、 K^+ 和 Sr^{2+} 含量也相对较低。

3) 潮坪相高部位浅滩是储层发育的物质基础,岩溶作用叠加改善是储层发育的关键,古溶沟区域地层厚度较薄,储层发育较差;丘台主体区域,岩溶水势能较强,有利于溶蚀物质带出,储层发育质量较好。深埋藏期热液溶蚀作用进一步提升储渗性能。

参 考 文 献

- [1] 黄东,张健,杨光,等. 四川盆地中三叠统雷口坡组地层划分探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(3):89-95.
Huang Dong,Zhang Jian,Yang Guang,et al. The discussion of stratum division and stratum for the Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition),2011,33(3):89-95.
- [2] 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 characteris-

tics and main controlling factors of the Leikoupo gas pools in the western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry,2019,39(6):34-44.

- [3] 郭旭升. 川西地区中、晚三叠世岩相古地理演化及勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(5):610-619.
Guo Xusheng. Litho-paleogeographic evolution in the Middle-Late Triassic in western Sichuan Province and its significance for petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology,2010,31(5):610-619.
- [4] 马永生,陈洪德,王国立,等. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京:科学出版社,2009:310-311.
Ma Yongsheng,Chen Hongde,Wang Guoli,et al. sequence stratum and paleogeography of South China[M]. Beijing: Science Press,2009:310-311.
- [5] 范志伟. 元坝气田雷口坡组古溶沟展布及其对气藏的控制[J]. 石油实验地质,2014,36(5):562-566.
Fan Zhiwei. Formation and evolution of weathering-crust reservoir in Leikoupo Formation, Yuanba Area[J]. Natural Gas Technology,2014,36(5):562-566.
- [6] 甘学启,宋文燕,王志萍. 裂缝对川中雷口坡组风化壳储层发育的影响[J]. 特种油气藏,2013,20(4):53-57.
Gan Xueqi,Song Wenyan,Wang Zhiping. The influence of fractures on the development of weathering crust reservoirs in the Leikoupo Formation in central Sichuan[J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2013,20(4):53-57.
- [7] 马治鸾,陈洪德,钟怡江,等. 四川盆地东北部元坝地区中三叠统雷口坡组四段古岩溶特征及其油气地质意义[J]. 地质通报,2012,31(4):577-585.
Ma Zhiluan,Chen Hongde,Zhong Yijiang,et al. Paleokarstification in carbonates of 4th Member of Middle Triassic Leikoupo Formation in northeastern Sichuan Basin and its petroleum geological significance[J]. Geological Bulletin of China,2012,31(4):577-585.
- [8] 郭旭升,胡东风,李宇平,等. 四川盆地元坝气田发现与理论技术[J]. 石油勘探与开发,2018,45(1):14-26.
Guo Xusheng,Hu Dongfeng,Li Yuping,et al. Discovery and theoretical and technical innovations of Yuanba gas field in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2018,45(1):14-26.
- [9] 胡东风. 普光气田与元坝气田礁滩储层特征的差异性及其成因[J]. 天然气工业,2011,31(10):17-21.
Hu Dongfeng. Differences in reef-bank reservoir features between Pu-guang and Yuanba gas fields and their reasons[J]. Natural Gas Industry,2011,31(10):17-21.
- [10] 段金宝,代林呈,李毕松,等. 四川盆地北部上震旦统灯影组四段储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业,2019,39(7):9-20.
Duan Jinbao,Dai Lincheng,Li Bisong,et al. Reservoir characteristics and their controlling factors of the fourth Member of Upper Sinian Dengying Formation in the northern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry,2019,39(7):9-20.
- [11] 孔强夫,杨才,李浩,等. 基于图论聚类和最小临近算法的岩性识别方法——以四川盆地西部雷口坡组碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质,2020,41(4):885-890.
Kong Qiangfu,Yang Cai,Li Hao,et al. A lithology recognition method based on multi-resolution graph-based clustering and K-Nearest

- Neighbor: A case study from the Leikoupo Formation carbonate reservoirs in western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41 (4): 885–890.
- [12] 郝哲敏, 许国明, 陈洪德, 等. 川西坳陷马井地区中三叠统雷四3亚段储层孔隙类型与面孔率定量研究[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41 (2): 381–392.
- Hao Zhemin, Xu Guoming, Chen Hongde, et al. Pore classification and thin section porosity quantification of reservoir in the $T_2^{4(3)}$ in Majing area, Western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41 (2): 381–392.
- [13] 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): 178–188.
- 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): 178–188.
- [14] 郭旭升, 胡东风, 段金宝. 中国南方海相油气勘探展望[J]. *石油实验地质*, 2020, 42 (5): 675–686.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Duan Jinbao. Marine petroleum exploration in South China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42 (5): 675–686.
- [15] 郭旭升, 郭彤楼, 黄仁春, 等. 中国海相油气田勘探实例之十六: 四川盆地元坝大气田的发现与勘探[J]. *海相油气地质*, 2014, 19 (4): 57–64.
- Guo Xusheng, Guo Tonglou, Huang Renchun, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 16): Yuanba gas field in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2014, 19 (4): 57–64.
- [16] 何江, 方少仙, 侯方浩, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田中奥陶统马家沟组岩溶型储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30 (3): 350–356.
- He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Characteristics of karst reservoirs in the Middle Ordovician Majiagou Formation of gas fields in the central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30 (3): 350–356.
- [17] Tinker S W, Mruk D H. Reservoir characterization of a Permian giant: Yates field, West Texas [C] // Stoudt E L, Harris P M. Hydrocarbon reservoir characterization: Geologic framework and flow unit modeling. Tulsa: SEPM, 1995.
- [18] Moore C H. Carbonate reservoirs porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001, 1–225.
- [19] 施振生, 王秀芹, 吴长江. 四川盆地上三叠统须家河组重矿物特征及物源区意义[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22 (4): 618–627.
- Shi Zhensheng, Wang Xiuqin, Wu Changjiang. The heavy minerals and provenances of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22 (4): 618–627.
- [20] 朱梅湘, 张秀莲, 王英华. 中下扬子区三叠纪海相碳酸盐岩成岩作用和成岩环境[J]. *古地理学报*, 2000, 2 (4): 43–50.
- Zhu Meixiang, Zhang Xiulian, Wang Yinghua. The diageneses and diagenetic environments of marine carbonate rocks of the Triassic in the Lower-Middle Yangtze region [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2 (4): 43–50.
- [21] 黄思静, 黄可可, 吕杰, 等. 早三叠世海水的碳同位素组成与演化——来自四川盆地东部的研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42 (10): 1508–1522.
- Huang Sijing, Huang Keke, Lv Jie, et al. Carbon isotopic composition of Early Triassic marine carbonates, Eastern Sichuan Basin, China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2012, 42 (10): 1508–1522.
- [22] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs: Geochemical techniques for evaluating origin and distribution [M]. Tulsa: AAPG, 1996.
- [23] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. *石油学报*, 2012, 33 (6): 950–960.
- Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2012, 33 (6): 950–960.
- [24] 夏明军, 戴金星, 邹才能, 等. 鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34 (3): 291–315.
- Xia Mingjun, Dai Jinxing, Zou Caineng, et al. Caledonian karst palaeogeomorphology and the forming condition of gas pool, southern Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34 (3): 291–315.
- [25] 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.
- Wang Xin, Xin Yongguang, Tian Han, et al. Research progress on sedimentation and reservoir of Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25 (3): 210–222.

(编辑 梁 慧)