

川西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

王琼仙^{1,2}, 宋晓波², 陈洪德¹, 刘昊年²

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059; 2. 中国石化 西南油气分公司 勘探开发研究院, 成都 610041)

摘要: 利用薄片、阴极发光、探针微量元素、激光碳氧同位素及包裹体测温等资料, 在龙门山前中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩储层中主要识别出3期5种胶结物, 在对不同期次和不同种类胶结物特征及分布特征研究的基础上, 结合胶结物的发育程度, 还原了胶结物对龙门山前雷口坡组四段上亚段不同类型白云岩储层孔隙演化的影响过程。研究认为: 第一期浅埋藏白云石胶结物形成是藻类白云岩储层孔隙破坏的主要阶段, 但本期胶结物产生后对残余孔隙起支撑作用, 有利于大量早期孔隙保存; 在第一期胶结物充填基础上叠加第二期表生期渗流砂充填, 破坏部分藻类白云岩早期残余孔隙; 第三期再埋藏含铁嵌晶方解石胶结是晶粒白云岩储层孔隙破坏的主要原因, 在藻类白云岩储层中, 该期胶结物不均匀分布进一步加剧了储层非均质性, 但本期胶结物的产生受到烃类和油气充注的抑制, 因此早期残余孔隙在漫长的再埋藏阶段得到较好保存。

关键词: 胶结物; 孔隙演化; 白云岩储层; 雷口坡组四段; 中三叠统; 龙门山前; 四川盆地西部

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Cement characteristics and effects on dolomite reservoir pores in the fourth member of Leikoupo Formation, Longmen Mountain front, western Sichuan Basin

WANG Qiongqian^{1,2}, SONG Xiaobo², CHEN Hongde¹, LIU Haonian²

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC Southwest Petroleum Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Based on the analysis of thin sections, cathode luminescence, electron probe, laser carbon, oxygen isotopes and inclusion thermometry, three periods including five cement types were observed in the dolomite reservoir of the 4th member of the Leikoupo Formation in Longmen Mountain front. Distribution characteristics and development degree indicated a reduction of the influencing process on pore cements. Phase 1 cement is dolomite. Its deposition is the main stage that leads to the porosity decline of the blue green algae agglutinate dolomite. However, after the cementation, the residual porosity has some supporting protection, and a large number of early pores are preserved. Phase 2 cement is the vadose silt that causes reservoir inhomogeneity of the blue green algae agglutinate dolomite. Phase 3 cement is the ferric calcite. These late diagenetic products generally filled in the pores of micritic-silty dolomite to further reduce the reservoir porosity, but this cement was inhibited by the organic acid. Therefore primary pores are well preserved in the long reburial stage.

Key words: cement; porosity evolution; dolomite reservoir; fourth member of Leikoupo Formation; Middle Triassic; Longmen Mountain front; western Sichuan Basin

形成在碳酸盐岩孔隙中的胶结物对孔隙演化主要起到破坏性作用^[1-3], 直接影响储层的品质。前人针对四川盆地不同地区的中三叠统雷口坡组滩相颗粒白云岩储层、藻粘结白云岩和晶粒白云岩储层、岩溶储层均开展过成岩作用及孔隙演化方面

的研究, 认为雷口坡组具有发育早期原生孔隙的沉积和成岩背景^[4], 但胶结作用导致储层原生孔隙难以保存下来^[5], 雷口坡组储层主要储集空间为次生孔隙^[6-9]。因此, 前人重点从大气淡水石膏溶蚀^[5]、表生岩溶^[10-13]、埋藏溶蚀^[14]的角度分析了

收稿日期: 2018-08-20; 修订日期: 2018-10-29。

作者简介: 王琼仙(1984—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 从事储层地质和成岩作用研究。E-mail: wqxtop@163.com。

基金项目: 中国石化十条龙重大科技攻关项目“龙门山前雷口坡组勘探开发关键技术”(P16092)资助。

雷口坡组储层的次生溶蚀孔隙形成演化过程,而针对早期孔隙保持过程及胶结作用对孔隙的影响研究较少。目前勘探结果证实,四川盆地西部龙门山前(图 1a)雷口坡组四段上亚段发育一套厚达 55~84 m 的潮坪相白云岩溶蚀孔隙型储层^[15-17],该套储层孔隙均形成于准共生—浅埋藏期^[18],储集空间主要为大量早期孔隙,但分布不均匀,孔隙发育段与孔隙欠发育段常叠置出现,孔隙欠发育段除了岩石自身孔隙欠发育外,各期胶结物的发育程度直接控制了现今储层的储集性能。因此,本文应用研究区 6 口钻井的薄片、阴极发光、探针微量元素、激光碳氧同位素及包裹体测温等资料,对孔隙中胶结物成分、分布、期次、形成环境进行分析,还原龙门山前该套白云岩储层孔隙保持和破坏过程,以期对储层的非均质性及优质储层分布规律认识提供依据。

1 地质背景

雷口坡组四段沉积时,川西地区主要为局限台地潮坪沉积环境。根据岩性的差异,纵向上雷四段进一步可划分为 3 个亚段,其中雷四下亚段为大套膏岩沉积,中亚段为膏岩、白云岩互层沉积,上亚段为一套厚 120~140 m 的碳酸盐岩沉积。龙门山前带储层均发育在雷四上亚段,其下部岩性为微粉晶白云岩、藻砂屑藻凝块白云岩和藻纹层白云岩交互,上部过渡为白云质灰岩和藻砂屑灰岩(图 1b)。

中三叠世天井山期,雷口坡组进入短暂浅埋藏环境;中三叠世末,受印支早期运动影响,地层抬升遭受剥蚀,造成龙门山前天井山组缺失,而雷口坡组则进入“弱暴露”的近地表大气淡水环境^[12-13];晚三叠世至今,雷口坡组进入了漫长的再埋藏环境。

雷四上亚段储层主要发育在藻砂屑藻凝块白云岩、藻纹层白云岩、微粉晶白云岩和含灰质白云岩中,储集空间以大量早期孔隙为主,如晶间孔、晶间溶孔、鸟眼—窗格孔、藻(粒)间溶孔。在雷四上亚段沉积后的准共生期—浅埋藏早期,由于潮坪强蒸发作用,雷四上亚段发生大规模白云化作用,形成广泛分布的厚层状微—粉晶半自形—自形晶白云岩,在白云化过程中发育了大量晶间孔;同时,研究区沉积时水体较浅、地势平坦,海平面升降容易发生间歇性的暴露而受到大气淡水溶蚀,晶粒白云岩晶间孔被溶蚀形成晶间溶孔,藻类白云岩被选择性溶蚀形成了大量鸟眼—窗格孔、藻间溶孔等。它们共同搭建了雷四上亚段储层早期孔隙格架,孔隙度可达 40%。统计表明,这些早期形成的孔隙中 8% 可直接保存为现今有效储集空间,17% 的早期孔隙经历了后期胶结充填破坏后,残余的孔隙仍可形成有效储集空间,另外 15% 的早期孔隙在孔隙演化过程中被胶结充填完全破坏,而后期的溶蚀作用对孔隙的改造较弱,新产生的孔隙仅占 2% 左右。因此,对于研究区雷四上亚段这类以早期孔隙

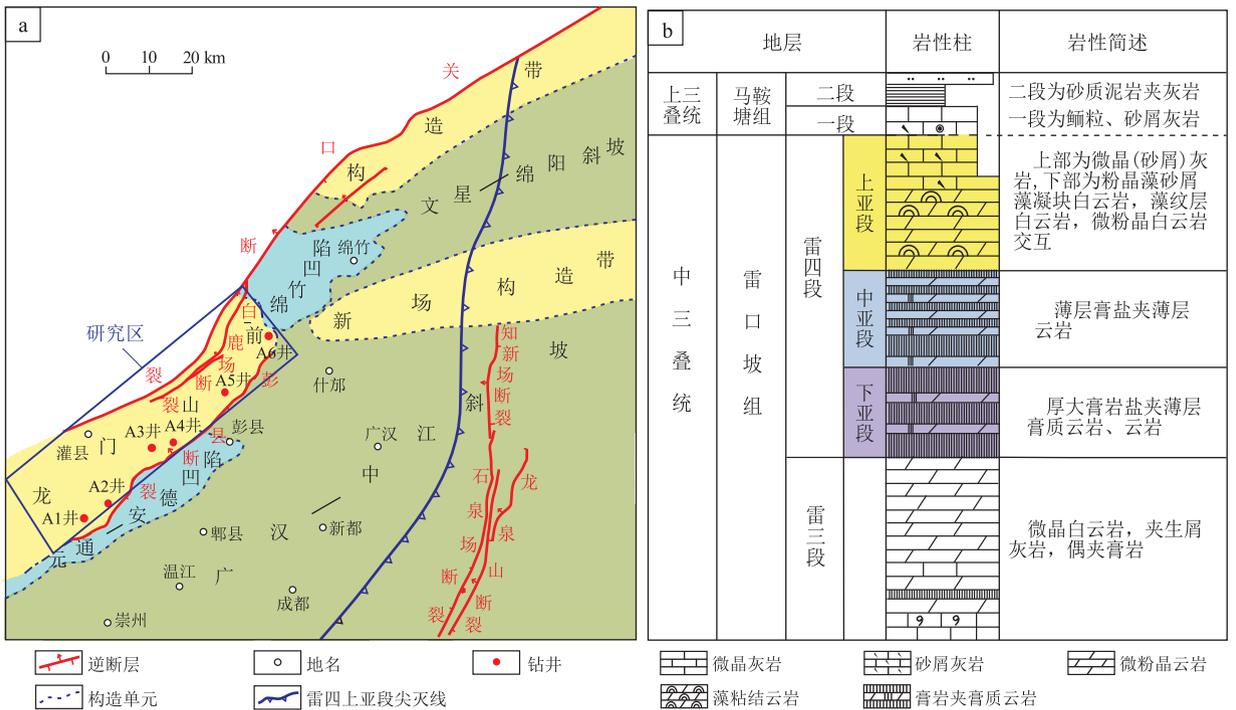


图 1 研究区位置和地层结构

Fig.1 Tectonic position and stratigraphic sequence division of the study area

为主的潮坪相白云岩储层,浅埋藏晚期—近地表—再埋藏期不同类型胶结物的产生和分布,直接影响了储层的储集性能。

2 胶结物特征及分布

根据孔隙中胶结物结构、地球化学特征及形成环境,研究区白云岩储层中主要识别出3期5种胶结物。

2.1 第一期胶结物

浅埋藏期形成的白云石胶结物,晶粒大小以微粉晶为主,主要呈粒状等厚环边(图2a、3a)和近等轴粒状镶嵌(图2b、d)2种方式充填于藻类白云岩的藻(粒)间溶孔及部分鸟眼—窗格孔中,使藻类白云岩早期孔隙降低10%~15%,而在晶粒白云岩中见少量胶结物以白云石次生加大边的形式出现,对储集空间影响较少。

微粉晶白云石胶结物常见与研究区第一期白云石充填的裂缝伴生(图2b),阴极射线下等厚环边白云石发褐色光(图3c-③),基质白云石也发褐色光(图3c-①),两者发光基本一致,表明它们所含的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 相似,形成环境基本相同。但本期白云石胶结物主要充填于准同生大气淡水溶蚀形成的孔隙中(图3c-②),证明形成时间稍晚于基质白云石。另外,该期白云石胶结物探针微量元素分析显示, FeO 含量为0~0.39‰, MnO 含量为

0.05‰~0.43‰,为无铁—微含铁白云石;激光碳氧同位素分析显示, $\delta^{13}C_{PDB}$ 为1.29‰, $\delta^{18}O_{PDB}$ 为-5.11‰(表1),碳同位素低正值,表明胶结物成岩流体具同期海水特征,氧同位素负偏不明显,表明胶结物形成环境埋深较浅,应形成于中三叠世末期,此时雷四上亚段地层处于海水潜流带或刚脱离海底环境,孔隙中充满同期海水,进入了中—低温、弱还原—还原的较浅埋藏成岩环境。

2.2 第二期胶结物

印支构造运动期近地表大气淡水环境形成渗流砂胶结物(图2a)。这种胶结物多充填在被等厚环边白云石胶结残余的溶孔中心,分布极不均匀,平均含量5%~8%,常与第二期泥质充填的裂缝伴生,主要破坏藻类白云岩中较大的残余孔隙,晶粒白云岩中较少见。阴极射线下渗流砂发褐色—橙红色光,为大气淡水胶结物特征。

2.3 第三期胶结物

第三期胶结物为上三叠统马鞍塘组沉积后的再埋藏期胶结物。根据薄片观察和包裹体测温结果分析(图4),再埋藏期胶结物包括:方解石、白云石、黄铁矿、石英和莹石等。

据薄片观察统计,方解石胶结物中,以第三期嵌晶方解石较常见(形成温度140~180℃)(图4),主要分布在晶间孔、晶间溶孔中(图2c),是晶粒白云岩储层储集性能变差及形成非储层的主要

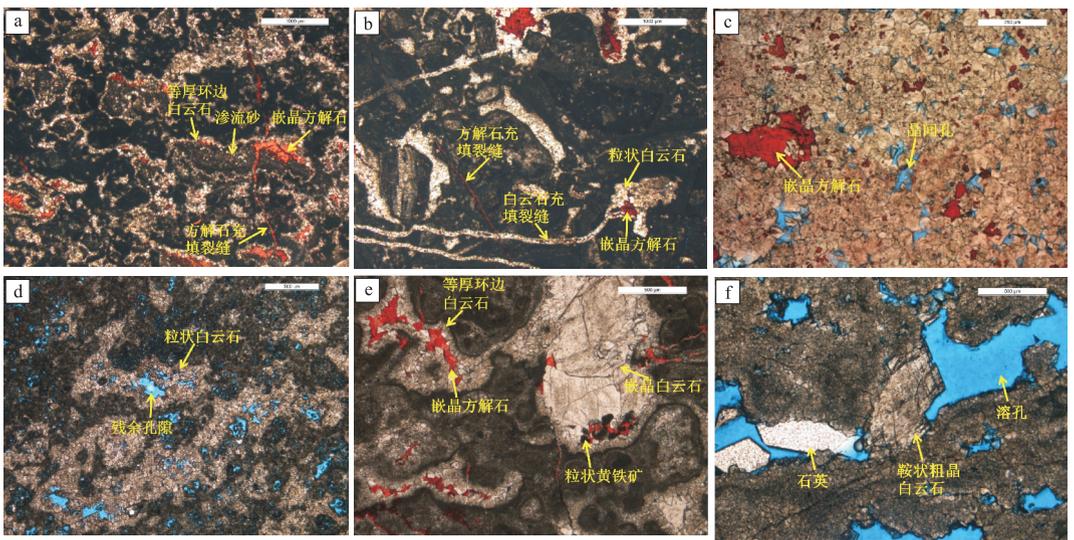


图2 川西龙门山前雷口坡组四段上亚段白云岩储层孔隙充填特征

a.鸟眼—窗格孔充填第一期等厚环边白云石+第二期渗流砂+第三期嵌晶方解石,裂缝和溶孔中方解石为同期产物,A2井,6 199.51 m,25-,染色薄片;b.粒间溶孔充填第一期粒状镶嵌白云石+第三期嵌晶方解石,发育2期裂缝,被白云石充填的裂缝早于方解石充填裂缝,A2井,6 200.82 m,25-,染色薄片;c.微粉晶含灰质白云岩,白云石晶间(溶)孔部分被第三期嵌晶方解石充填,A2井,6 195.5 m,100-,染色蓝色铸体片;d.藻间孔充填第一期晶粒白云石,见残余孔隙,A5井,6 785.65 m,40-,蓝色铸体片;e.粒间溶孔被第一期等厚环边白云石+第三期嵌晶方解石、黄铁矿、嵌晶白云石充填,A2井,6 227.6 m,50-,染色薄片;f.埋藏环境的第三期马鞍状粗晶白云石及原生石英充填溶孔,A2井,6 219.45 m,50-,蓝色铸体薄片

Fig.2 Pore filling characteristics of dolomite reservoir of $T_2L_4^3$ in Longmen Mountain front, western Sichuan Basin

表 1 川西龙门山前雷口坡组四段上亚段白云岩储层孔隙主要胶结物地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of cements in the dolomite reservoir of $T_2L_4^3$ in Longmen Mountain front, western Sichuan Basin

地化参数及特征	主要胶结物					
	第一期	第二期	第三期			
	粒状、等厚 环带状白云石	渗流砂	细—粗晶 白云石	嵌晶 方解石	嵌晶白云石	石英、莹石、 黄铁矿
探针 微量 元素	$w(\text{FeO})/\%$	0~0.39 0.35 (15)	0.24~0.61 0.395 (4)	0.02~1.2 0.296 (15)	0.07~0.9 0.45 (5)	
	$w(\text{MnO})/\%$	0.05~0.43 0.199 (15)	0~0.18 0.076 (4)	0.08~0.57 0.287 (15)	0~0.28 0.155 (5)	
激光 碳氧 同位素	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$	1.29		-0.36~1.66 -0.33(3)	2.11~3.74 2.78(3)	
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\%$	-5.11		-9.67~-5.34 -7.98(3)	-6.52~-4.07 -5.46(3)	
包裹体	均一温度/°C		135~155	140~180	200~210	170~200
阴极发光	褐色光	褐色—橙红色光	桔红色 (环带结构)	不发光 (少量褐色光)	桔红色	不发光
成岩环境	浅埋藏	表生大气淡水	再埋藏	再埋藏	再埋藏	再埋藏

注:表中数字意义为
最小值~最大值
平均值(样品数)。

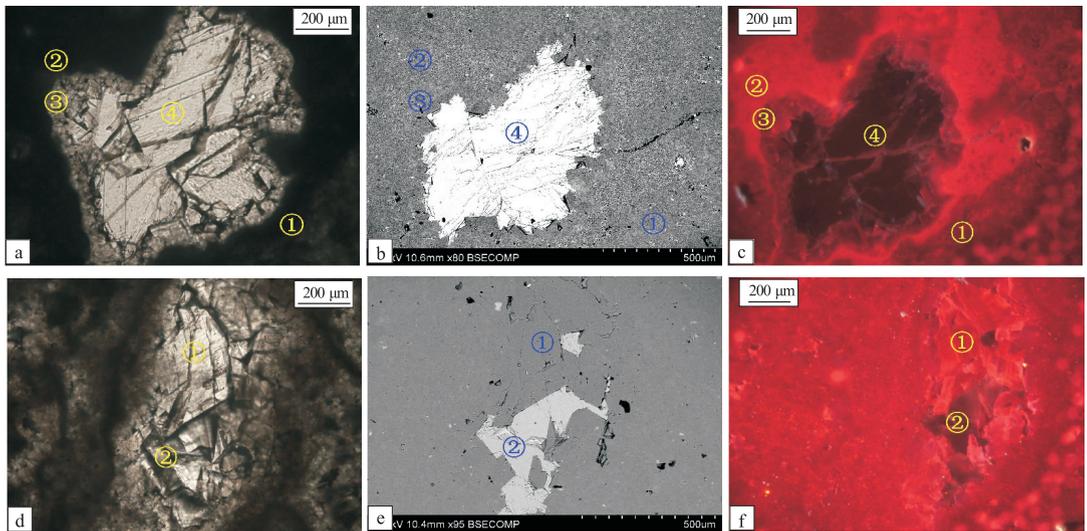


图 3 川西龙门山前雷口坡组四段上亚段胶结物薄片、扫描电镜和阴极发光照片

a. ①②为基质白云石, ③为溶孔边缘充填的第一期(浅埋藏期)马牙状微粉晶白云石环边, ④为溶孔中心充填嵌晶方解石, A5井, 5769.35 m, 100-, 普通薄片照片; b. ①②③均为白云石, 背反射光为灰黑色, ④为嵌晶方解石, 背反射光呈浅白色, A5井, 5769.35 m, 背反射光照片; c. ①基质白云石发褐色光, ②被准同期淡水改造的溶孔外边缘, 阴极发光呈橙红色, ③溶孔内边缘充填的马牙状微粉晶白云石环边发褐色光(与基质发光相似), ④溶孔中心充填的嵌晶方解石不发光, A5井, 5769.35 m, 阴极发光照片; d. 含灰质藻白云岩, 溶孔充填的第三期(再埋藏期)粗晶白云石+嵌晶方解石, A5井, 5769.09 m, 100-, 普通薄片照片; e. ①白云石背反射光为灰黑色, ②嵌晶方解石为浅白色, A5井, 5769.09 m, 背反射光照片; f. ①粗晶白云石发环带状褐色、桔红色光, ②嵌晶方解石不发光, A5井, 5769.09 m, 阴极发光照片

Fig. 3 Scanning electron and cathodoluminescence photomicrographs of cements of $T_2L_4^3$ in Longmen Mountain front, western Sichuan Basin

原因, 孔隙下降 10%~15%; 在藻类白云岩溶孔中, 嵌晶方解石分布极不均匀, 但这类胶结物一旦出现, 可完全破坏藻类白云岩早期孔隙(图 2a、b、e)。白云石胶结物, 包括细—粗晶白云石(图 3d)、鞍状白云石(图 2f)和嵌晶白云石(图 2e)。其中, 细—粗晶白云石和嵌晶白云石较鞍状白云石更为常见; 薄

片观察白云石胶结物对孔隙破坏作用较有限, 孔隙下降 2%左右。另外胶结物中见到少量自生石英(图 2f)、黄铁矿、莹石等, 对孔隙破坏作用不明显。

根据包裹体测温分析及薄片观察, 再埋藏期主要的胶结物形成顺序依次为:

(1) 细—粗晶白云石胶结物(图 3d): 阴极射

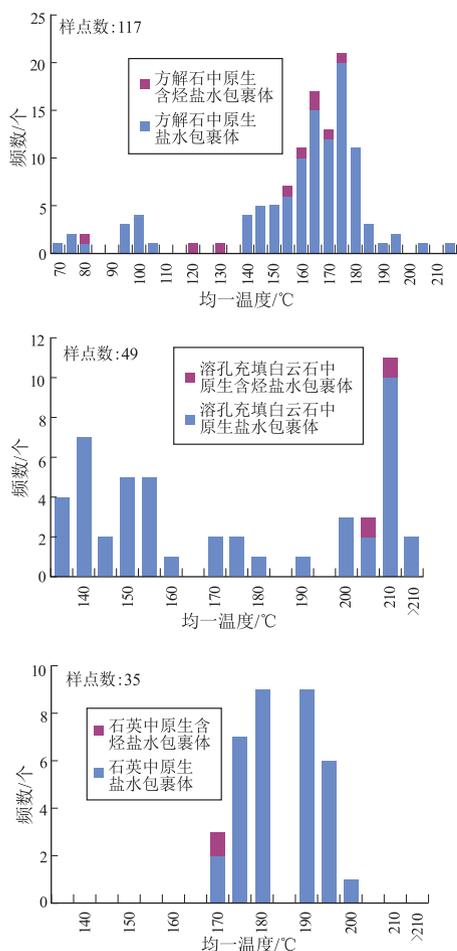


图4 川西龙门山前雷口坡组四段上亚段晚期胶结物包裹体均一温度分布

Fig.4 Homogeneous temperatures of gas-fluid inclusions of the late cementation of $T_2l_4^3$ in Longmen Mountain front, western Sichuan Basin

线下发橙红色光,且白云石晶体多具埋藏期胶结物特有的环带发光结构(图3f-①)。

(2) 嵌晶方解石胶结物:在阴极射线下不发光(图3c),少量发褐黑色光,探针微量元素 FeO 为 0.02‰~1.2‰、MnO 为 0.08‰~0.57‰(表1),为微含铁—含铁方解石;激光碳氧同位素分析 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为 -0.36‰~1.66‰, $\delta^{18}O_{PDB}$ 为 -9.67‰~-5.34‰(表1),碳同位素低负值表明成岩流体中碳来源于印支早期构造抬升运动造成的淡水下渗,氧同位素与第一期胶结物相比明显负偏,说明下渗的淡水封存于孔隙中进入埋藏环境沉淀胶结。

(3) 嵌晶白云石胶结物:阴极射线下发桔红色光,探针微量元素 FeO 为 0.07‰~0.9‰、MnO 平均为 0~0.28‰(表1),为微含铁—含铁白云石;激光碳氧同位素 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为 2.11‰~3.74‰, $\delta^{18}O_{PDB}$ 为 -6.52‰~-4.07‰(表1),同时根据伴生矿物黄铁矿(图2e)及石英、萤石等,可推测胶结物形成与埋

藏期含 H_2S 的高温热液^[19]有关。

3 胶结物对储层孔隙的影响

3.1 浅埋藏晚期

中三叠世晚期,雷四上亚段多孔白云岩地层进入海水潜流带或刚脱离海底环境的浅埋藏成岩环境,沉积物和孔隙水由开放进入半封闭—封闭环境。虽然准同生及浅埋藏早期白云化作用消耗了大量 Mg^{2+} ,但随着埋深增加,温度、压力的增高,受孔隙封存海水和上覆地层下渗的沉积海水影响,在晶粒白云岩中形成少量次生加大边,在藻类白云岩孔隙中形成两种产状的白云石胶结物占据早期孔隙空间,一种为粒状等厚环边白云石,平均含量为 5%左右,这种内衬环边胶结物对孔隙破坏不明显;另一种为近等轴粒状镶嵌分布的微粉晶白云石,平均含量为 10%~15%。这期白云石胶结物普遍发育,是藻类白云岩孔隙下降的主要原因。但这期白云石胶结物大多数半充填孔隙,大量残余孔隙可进入下一个孔隙演化阶段,部分孔隙能直接保存为现今有效储集空间,形成优质储层。因此,白云石胶结物对晶粒白云岩孔隙影响不大,对藻类白云岩孔隙破坏明显,但胶结物形成后对残余孔隙起较好支撑保护作用,大量早期孔隙可较好保存。

3.2 近地表期

上三叠统沉积前,受印支运动影响,龙门山前雷四上亚段地层抬升进入近地表大气淡水环境。经过上一阶段浅埋藏白云石胶结充填后,具不同孔隙度的白云岩储层再次受到大气淡水改造,产生了不同程度的溶蚀及充填作用,镜下观察溶蚀作用较弱。这一阶段以渗流砂充填破坏为主,渗流砂平均含量为 5%~8%。这阶段胶结物分布局限,且极不均匀,主要受印支晚期构造抬升、卸载产生的裂缝(泥质充填裂缝)分布的控制。经过这一阶段充填破坏,藻类白云岩中少部分相对较大的鸟眼—窗格孔和藻间溶孔消失,可直接形成非储层,而大量未被充填的鸟眼—窗格孔、小孔径的藻间溶孔和晶粒白云岩中晶间孔、晶间溶孔进入下一孔隙演化阶段,部分可直接保存为现今有效储集空间。这期胶结物对晶粒白云岩储层影响较小。

3.3 再埋藏期

晚三叠世至今,雷四上亚段储层进入稳定的埋藏环境,多期胶结作用破坏孔隙,其中嵌晶方解石胶结对孔隙破坏最严重,10%~15%的晶间孔、晶间溶孔及藻间孔隙遭到破坏,加剧了储层非均质性。其他胶结物,如细—粗晶白云石、嵌晶白云石及黄

铁矿、石英、萤石等对孔隙破坏作用不明显。再埋藏期发生胶结作用的同时,也发生了少量埋藏溶蚀作用(图 2f),但埋藏期溶蚀较弱,产生新的孔隙较少,主要是沿着残余孔、缝和龙门山推覆挤压产生的构造裂缝^[20]的溶蚀扩大,进一步改善了储层的储渗条件,提高储层的品质。

虽然再埋藏期形成的胶结物破坏作用明显,但这些胶结物分布极不均匀。统计表明,现今构造高部位的钻井揭示孔隙中埋藏期胶结物整体较少,储层早期孔隙保存较好,而构造相对低部位孔隙大量被方解石胶结物破坏,储层储集性能变差。

前人研究表明,川西坳陷龙门山前带等正向构造单元自印支晚期即具雏形,燕山期进一步发展,喜马拉雅期定型^[15];而研究区雷口坡组气源主要来自二叠系及雷口坡组自身,天然气为混源油型气^[15,21]。其中,二叠系烃源岩在印支早期即达到生烃门限,印支晚期达到生烃高峰;雷口坡组自身烃源岩在印支晚期上三叠统须家河组三段沉积末期进入生烃门限,须家河组五段沉积末期进入生烃高峰,烃源岩演化与构造演化匹配较好。从包裹体分析看出(图 4),嵌晶方解石胶结物形成高峰期,含烃盐水包裹体数量也变多,说明嵌晶方解石形成的同时烃类活动也较活跃。因此笔者推测,构造高部位及斜坡区长期处于烃类充注有利区,烃类充注后,抑制规模方解石胶结物的形成,较好地保存了早期孔隙;而构造相对低部位烃类和油气充注情况不佳,因此,大量构造低部位的孔隙被方解石胶结破坏。

4 结论

(1)研究区胶结物主要有 3 期 5 种:第一期胶结物形成于浅埋藏晚期的无铁—微含铁微粉晶白云石,普遍分布在藻类白云岩各类早期孔隙中;第二期胶结物为构造期近地表大气淡水环境形成的渗流砂,主要分布在藻类白云岩残余孔隙中,分布局限且极不均匀;第三期胶结物为再埋藏环境形成的含铁嵌晶方解石和少量含铁细—粗晶白云石、嵌晶白云石。其中,含铁嵌晶方解石是晶粒白云岩晶间孔和晶间溶孔中最主要的胶结物,而在藻类白云岩中充填早期残余孔隙,分布极不均匀。

(2)第一期浅埋藏白云石胶结充填是藻类白云岩孔隙下降的主要阶段,但这期胶结物的形成对残余孔隙有一定支撑保护作用,保存了大量早期孔隙;第二期渗流砂充填破坏部分藻类白云岩早期残余孔隙,分布局限,对孔隙影响不大;第三期再埋藏

含铁嵌晶方解石胶结是晶粒白云岩孔隙变差的主要原因,在藻类白云岩储层中,该期胶结物不均匀分布进一步加剧了储层非均质性,但这期胶结物的产生受到烃类和油气充注的抑制,因此构造相对高部位的早期残余孔隙在漫长的再埋藏阶段得到较好地保存。

参考文献:

- [1] 金强,康逊,田飞.塔河油田奥陶系古岩溶径流带缝洞化学充填物成因和分布[J].石油学报,2015,36(7):791-798.
JIN Qiang, KANG Xun, TIAN Fei. Genesis of chemical fillings in fracture-caves in paleo-karst runoff zone in Ordovician and their distributions in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 36(7): 791-798.
- [2] 王瑞华,牟传龙,谭钦银,等.达县—宣汉地区长兴组礁滩白云岩成岩过程中的孔隙演化[J].沉积与特提斯地质,2007,27(2):9-13.
WANG Ruihua, MOU Chuanlong, TAN Qinyin, et al. Porosity evolution during the diagenesis of the reef shoal dolostones from the Changxing Formation in the Daxian-Xuanhan region, Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(2): 9-13.
- [3] 王兴志,穆曙光,方少仙,等.四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J].沉积学报,2000,18(4):549-554.
WANG Xingzhi, MU Shuguang, FANG Shaoxian, et al. Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in southwest Sichuan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 549-554.
- [4] 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.
- [5] 曾德铭,王兴志,康保平.川西北雷口坡组储层原生孔隙内胶结物研究[J].天然气地球科学,2006,17(4):459-462.
ZENG Deming, WANG Xingzhi, KANG Baoping. A study on cement in primary pore of the Leikoupo Formation reservoir in the northwest of Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(4): 459-462.
- [6] 曾德铭,王兴志,张帆,等.四川盆地西北部中三叠统雷口坡组储层研究[J].古地理学报,2007,9(3):253-266.
ZENG Deming, WANG Xingzhi, ZHANG Fan, et al. Study on reservoir of the Leikoupo Formation of Middle Triassic in northwestern Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(3): 253-266.
- [7] 吴世祥,李宏涛,龙胜祥,等.川西雷口坡组碳酸盐岩储层特征及成岩作用[J].石油与天然气地质,2011,32(4):542-550.
WU Shixiang, LI Hongtao, LONG Shengxiang, et al. A study on characteristics and diagenesis of carbonate reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 542-550.
- [8] 梁世友,陈迎宾,赵国伟,等.四川盆地川西坳陷雷口坡组四段稀土元素地球化学特征及意义[J].石油实验地质,

- 2017, 39(1): 94-98.
- LIANG Shiyu, CHEN Yingbin, ZHAO Guowei, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements and their geological significance in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(1): 94-98.
- [9] 陈迎宾, 胡焯, 王彦青, 等. 大邑构造雷口坡组四段天然气成藏条件 [J]. *特种油气藏*, 2016, 23(3): 25-29.
- CHEN Yingbin, HU Ye, WANG Yanqing, et al. Natural gas accumulation conditions of the 4th Member in Leikoupo Formation of Dayi structure [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(3): 25-29.
- [10] 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.
- [11] 谢刚平. 川西拗陷雷四上亚段晶粒白云岩成岩作用和孔隙演化 [J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2015, 12(17): 24-26.
- XIE Gangping. Diagenesis and porosity evolution of crystal grain dolomite in the upper section of the 4th member of Leikoupo Formation in the Western Sichuan Depression [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2015, 12(17): 24-26.
- [12] 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 Qiongqian, 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.
- [13] 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.
- TANG Yu. Characterization of the sedimentation of the Leikoupo Formation and the weathering crust reservoirs at the top of the formation in the western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(1): 42-47.
- [14] 李蓉, 许国明, 宋晓波, 等. 川西拗陷雷四3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 fourth Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2016, 40(5): 63-74.
- [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.
- LI Shubing, XU Guoming, SONG Xiaobo. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in front of Longmenshan piedmont tectonic belt, western Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(3): 74-82.
- [16] 陈昱林, 曾炎, 段永明, 等. 川西龙门山前雷口坡组四段白云岩储层孔隙结构特征及储层分类 [J]. *石油实验地质*, 2018, 40(5): 621-631.
- CHEN Yulin, ZENG Yan, DUAN Yongming, et al. Pore structure characteristics and reservoir classification of dolomite reservoirs in fourth member of Leikoupo Formation, Longmen Mountain front, western Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(5): 621-631.
- [17] 李宏涛, 胡向阳, 史云清, 等. 四川盆地川西拗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.
- [18] 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 Qiongqian, 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 & Experiment*, 2017, 39(4): 491-497.
- [19] 朱光有, 张永昌, 梁英波, 等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造: 四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2182-2194.
- ZHU Guangyou, ZHANG Yongchang, LIANG Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2182-2194.
- [20] 鲁人齐, 何登发, SUPPE J, 等. 龙门山中段山前带构造楔的发现及其几何学、运动学特征: 对青藏高原东南缘隆升动力学机制的约束 [J]. *地学前缘*, 2010, 17(5): 93-105.
- LU Renqi, HE Dengfa, SUPPE J, et al. The discovery of structural wedges in the central Longmen Mountains front belt and its geometric and kinematic characteristics: constraints on the dynamical mechanism of uplifting in the southeast margin of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(5): 93-105.
- [21] 谢刚平. 川西拗陷中三叠统雷口坡组四段气藏气源分析 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(4): 418-422.
- XIE Gangping. Source of gas reservoirs in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(4): 418-422.