

川中龙岗—营山地区雷口坡组雷四³亚段储层成岩作用及孔隙演化

吴仕玖¹ 曾德铭¹ 王兴志¹ 李 顺² 陈 虎³ 王 岩⁴

(1.西南石油大学“油气藏地质及开发”国家重点实验室,四川 成都 610500;2.中国石油西南油气田公司川中油气矿,四川 遂宁 629000;3.中国石油西南油气田公司川西北气矿,四川 江油 621709;4.中石化西南油气分公司工程监督中心,四川 德阳 618000)

摘要:四川盆地中部龙岗—营山地区中三叠统雷口坡组雷四³亚段储层发育较好,在颗粒型白云岩中显示丰富的油气,具有良好的勘探前景。通过对研究区 30 余口钻井岩心、薄片的宏观及微观观察,结合地球化学特征,对成岩作用类型及特征进行较详细的研究,探讨了成岩作用与储集空间演化的关系。研究发现区内雷四³亚段储层成岩演化过程复杂,各种成岩作用发育,储层质量的好坏受成岩作用影响明显。压实压溶作用、多期胶结作用以及多期充填作用导致粒间孔、晶间孔大幅度减少;混合水白云石化作用、表生期和埋藏期溶蚀作用以及构造破裂作用是优质储层形成的关键,形成了大量的粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔和溶蚀缝,成为现今该层段的主要储集空间。

关键词:成岩作用;储层;储集空间;雷口坡组;龙岗—营山地区

中图分类号:P588.2;P618.130.2¹

文献标志码:A

文章编码:1000-3657(2013)03-0919-08

四川盆地川中龙岗—营山地区雷口坡组顶部四段 3 亚段广泛发育颗粒型白云岩,该套地层取心丰富,油气显示频繁,试油和中测成果显著,展示了良好的勘探前景。对于控制该套地层孔隙发育的机理何在是当前勘探最关心的问题。众所周知,碳酸盐岩易受成岩作用的影响,成岩作用是控制碳酸盐岩储层发育的最重要因素之一^[1-4]。因此,笔者以龙岗—营山地区雷口坡组雷四³亚段储层为研究对象,综合利用钻井岩心、常规薄片、铸体薄片以及地化资料,系统研究成岩作用类型及特征、成岩作用与储集空间的关系,分析储层孔隙演化过程,以便认识储层分布规律,为区域内雷口坡组勘探与开发提供有利的地质理论依据。

1 地质概况

龙岗—营山地区位于四川盆地中部,东北起于通江凹陷,西南止于川中隆起区北缘的营山构造,东南到川东南断褶带,西北抵苍溪凹陷。四川盆地中部

在中三叠世雷口坡期基本处于封闭条件较好的局限浅水陆表海台地环境,水体浅、能量弱、盐度较大、海底地形平缓、范围广阔是环境的基本特征^[5]。龙岗—营山地区雷四³亚段主要沉积了一套富含蓝绿藻和颗粒的白云岩,形成云坪、灰坪和颗粒滩,岩性以角砾白云岩、角砾灰岩、泥晶白云岩、泥质白云岩、泥晶灰岩和砂屑白云岩为主,少量为藻纹层白云岩、泥—粉晶白云岩及鲕粒白云岩(图 1)。雷四³亚段顶部与须家河组呈假整合接触,底部与雷四²亚段连续过渡,内部根据岩性、电性及储层分布特征将其由下至上分为 a、b、c 共 3 个小层,油气主要分布在 a 小层的角砾白云岩、砂屑白云岩、鲕粒白云岩和泥—粉晶白云岩中,主要的储集空间为粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔和溶蚀扩大缝。

2 成岩作用类型与储集空间的关系

储层质量的优劣与储集空间的发育与否及发育好坏有关,直接受到成岩作用的控制^[6-9]。通过 30 余

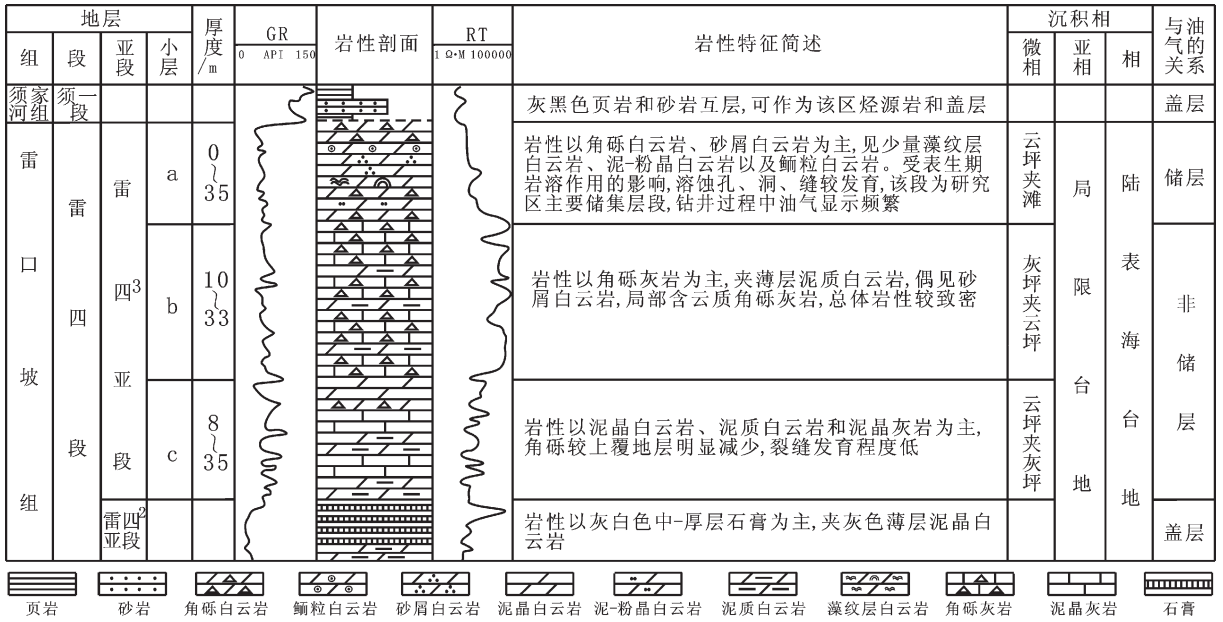


图1 川中龙岗—营山地区中三叠统雷口坡组雷四³亚段沉积相及地层综合柱状图
Fig.1 Comprehensive column of sedimentary facies and stratigraphy of the Leikoupo-4³ Formation of the middle triassic in Longgang-Yingshan region of central Sichuan basin

表1 川中龙岗—营山地区雷口坡组雷四³亚段成岩环境-成岩作用简表

Table 1 Diagenetic environment of the Leikoupo-4³ Formation of the middle triassic in Longgang-Yingshan region of central Sichuan basin

成岩环境	破坏性成岩作用	建设性成岩作用
海底成岩环境	第一期胶结作用	微生物泥晶化作用
同生-准同生成岩环境	机械充填作用	白云石化作用和溶蚀作用
表生成岩环境	机械充填作用	溶蚀作用
浅埋藏成岩环境	压实作用、第二期胶结作用	重结晶作用
中-深埋藏成岩环境	第三、四期胶结作用,机械充填作用、压实压溶作用	溶蚀作用、破裂作用

口井岩心、薄片的宏观及微观观察,结合地球化学特征,认为研究区雷四³亚段先后受到海水、大气淡水和地层水的影响以及构造运动的改造,经历了压实压溶、胶结、充填、白云石化、溶蚀和破裂等成岩作用(表1),储集空间受影响较大,最终将以粒间孔和晶间孔等原生孔隙为主的沉积物改变为以粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔和溶蚀缝占绝对优势的孔隙型或裂缝-孔隙型储层。

2.1 压实压溶作用

压实作用主要发生在沉积之后到受印支运动影响构造抬升之前,是造成孔隙度随埋藏深度增加而不断降低的主要原因。随着沉积不断进行,压实强度不断增大,颗粒从漂浮状逐渐过渡为点接触、点线接

触、线接触,形成定向排列(图2-1),这一变化使得原始储集空间减少,甚至消失。压溶作用是压实作用的进一步体现和发展,主要表现为缝合线的形成,在后期溶蚀作用的影响下,部分缝合线可扩溶成串珠状溶孔,形成有利的储集空间。

2.2 胶结作用

根据胶结物的充填顺序、形成时间、成岩环境、结构以及地球化学等特征,将研究区雷四³亚段储层原生孔隙中胶结物分为4期7种胶结类型(表2)。

第一期胶结物以白云石分布最广,是海底成岩环境中的产物,多以纤状、马牙状和短柱状垂直于颗粒或原生孔隙边缘分布,单环带为主(图2-2a),晶体干净明亮,环边前缘呈微尖菱形,局部与第二期粉-细晶白云石或单晶石膏胶结物呈弱溶蚀不整合接触;Na⁺、K⁺和Sr²⁺的含量在所有胶结物中最高,Fe²⁺含量较低,阴极射线下发暗褐色光。该期胶结物可使原生孔隙降低3%~6%。

第二期胶结物以石膏最为常见,是浅埋藏环境中的产物,石膏晶体形态多样,以连晶、多晶和鳞片状为主(图2-2b),常与第一期马牙状白云石呈整合或溶蚀不整合接触,阴极射线下发光极为昏暗或不发光,水溶液包裹体含量较多,均一温度一般为50°C~60°C。此外,细-粉晶白云石中Na⁺、K⁺和Sr²⁺

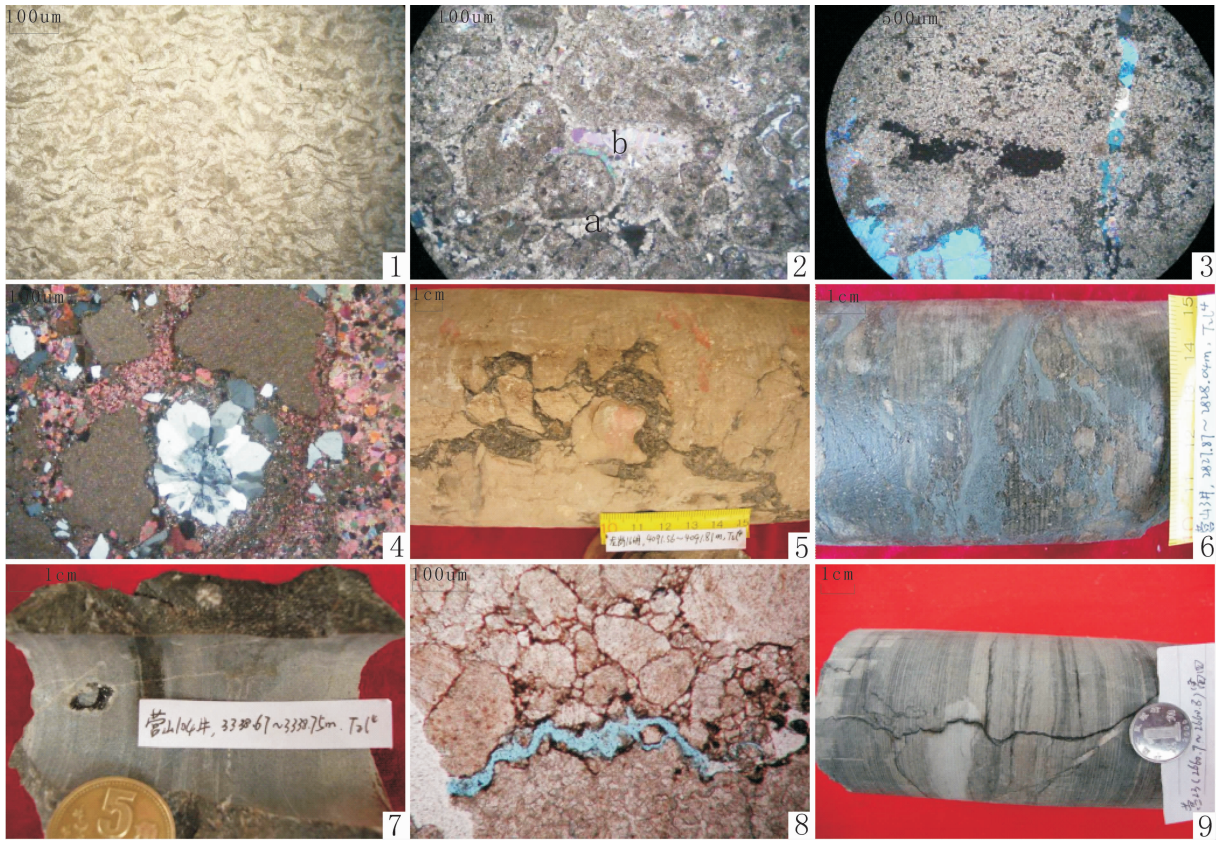


图 2 川中龙岗—营山地区雷口坡组雷四³亚段储层成岩作用宏微观特征

(1,8 单偏光;2,3,4 正交偏光;5,6,7,9 岩心)

- 1—亮晶砂屑云岩中砂屑被压实变形,暗色砂屑定向排列,龙岗 22 井,井深 2819.4 m;
- 2—砂屑云岩中的两期胶结(a 为第一期马牙状白云石,b 为二期连晶石膏),营 22 井,井深 2815.7 m;
- 3—泥—粉晶云岩中第三期方解石胶结,营 23 井,井深 2658.6 m;
- 4—角砾灰岩中的第四期玉髓胶结,营 23 井,井深 2652.8 m;
- 5—灰白色泥—粉晶白云岩中溶沟被暗色泥屑—粉屑充填,龙岗 166 井,4091.56~491.81 m;
- 6—深灰色白云质角砾岩中溶沟被蓝灰色泥岩充填,营山 3 井,2827.87~2828.04 m;
- 7—浅灰色泥—粉晶云岩中溶蚀孔洞,营山 104 井,3338.67~3338.75 m;
- 8—粉晶残余砂屑白云岩中溶蚀扩大缝,营 21 井,664.95 m;
- 9—浅灰色白云岩、灰岩互层中的高角度裂缝,未充填,营 23 井,2660.7~2660.8 m

Fig.2 Macroscopic and microscopic features of reservoir diagenetic characteristics of Leikoupo-43 Formation in Longgang-Yingshan area of central Sichuan basin

(1,8: Plainlight;2,3,4: Crossed nicols;5,6,7,9: Cores)

- 1—Dark arenite in sparite dolomite deformed by compaction, directionally aligned, Longgang 22 well, 2819.4 m;
- 2—Two-stage cementation in sparite dolomite (a represents the first stage of horse tooth structure dolomite; b represents the second stage of intergrowth gypsum), Ying 22 well, 2815.7m;
- 3—The third stage calcite cementation in micritic-crystallite dolomite, Ying 23 well, 2658.6m;
- 4—The fourth stage gelite cementation in brecciated limestone, Ying 23 well, 2652.8m;
- 5—Solution groove in gray micritic-crystallite dolomite filled with dark micritic-crystallite clastics, Longgang 166 well, 4091.56m~491.81m;
- 6—Solution groove in dark gray dolomitic brecciated dolomite filled with blue gray mudstone, Yingshan 3 Well, 2827.87m~2828.04m;
- 7—Solution pore and hole in light gray micritic-crystallite dolomite, Yingshan 104 well, 3338.67m~3338.75m;
- 8—Corroded expansion seam in crystallite residual dolomite, Yingshan 21 Wells, 664.95m;
- 9—High angle fracture in light gray dolomite interbedded limestone, unfilled, Ying 23 well, 2660.7m~2660.8m

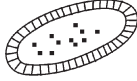
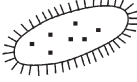
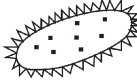

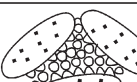


含量较高, Fe²⁺和 Mn²⁺比第一期胶结物少, 阴极射线下发暗褐色光, 由边缘向内发光逐渐增强。该期胶结物可降低原生孔隙的 50%~70%。

第三期胶结物以方解石为主, 是中-深埋藏环境中的产物, 以单晶或嵌晶形式充填于孔隙或孔洞的中心部位, 晶体粗大明亮(图 2-3), 多与第一期柱

状、马牙状白云石或第二期细晶方解石呈溶蚀不整合或整合接触。Na⁺、K⁺和 Sr²⁺含量最低, Fe²⁺和 Mn²⁺明显降低, 均一温度为 190℃~200℃, 阴极射线下发光一般呈褐黄-亮橙黄色。该期胶结物可使孔隙度降低 10%~20%。

第四期胶结物为硅质石英或玉髓(图 2-4), 是构

表 2 川中龙岗—营山地区雷口坡组雷四³亚段胶结物类型及特征
 Table 2 Cement types and characteristics of Middle Triassic Leikoupo-4³ Formation in Longgang-Yingshan area of central Sichuan basin

期次	胶结充填类型	图 示	主 要 特 征	成 岩 环 境
第一期	马牙状白云石		多呈单环边围绕颗粒或孔隙边缘分布, 可充填原生孔隙3%~6%。	海底潜流带
	纤状方解石		纤状方解石垂直颗粒呈还边胶结, 充填原生孔隙2%~5%。	
第二期	刃状方解石		刃状方解石作为第一世代胶结物生长于颗粒边缘, 或作为第二世代胶结物覆盖于纤状方解石边缘, 充填孔隙1%~3%。	浅埋藏
	鳞片状-多晶-连晶石膏		分布于雷四亚段b小层的颗粒白云岩中, 充填原生孔隙50%~70%。	
	细-粉晶白云石或方解石		等轴细粉粒状方解石或白云石充填粒内溶孔和粒间孔, 充填原生孔隙10%~30%。	
第三期	粗晶方解石		粗晶方解石以单晶或嵌晶充填残余原生孔和孔缝洞的中心部位, 充填储集空间10%~20%。	中-深埋藏
第四期	细-中晶石英		细-中晶它形、半自形石英仅位于大的次生溶孔或裂缝内部, 可充填其孔隙的3%~8%。	构造期

造成岩环境的产物, 偶见于较大的次生溶孔和裂缝中, 含量小于 5%, 均一温度一般为 110°C~130°C, 阴极射线下不发光, 仅在局部降低孔隙度 3%~8%。

2.3 机械充填作用

机械充填作用主要分布于溶沟和溶洞中, 碎屑充填物主要有 3 期:

第一期为细粒机械碎屑物, 发生于同生-准同生阶段, 多充填于小型溶沟, 溶孔和孔隙底部, 后者与上覆连晶胶结物构成示底构造。该期充填物规模及厚度小, 对现今储层影响不明显。

第二期为机械垮塌碎屑物, 发生在表生成岩阶段, 主要位于大的溶沟溶洞中(图 2-2), 成分复杂, 分选很差, 砾间填隙物多为细粒机械碎屑物、粘土矿物和少量亮晶白云石、方解石等。它是区内雷口坡组雷四³亚段储层中缺乏大型溶沟、溶洞等较大储集空间的主要原因。

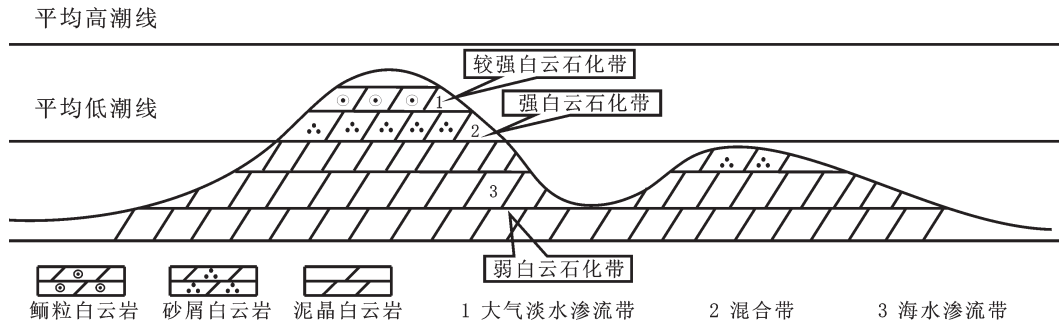
第三期充填作用发生在中-晚成岩阶段, 雷口坡组经历了印支运动的抬升之后, 海水退出, 四川盆地渐变成湖盆, 在燕山运动期地壳再次下降, 上面被

厚的岩层覆盖。该期作用使得雷四³亚段原来可以成为较好储集空间的孔隙, 如粒间溶孔、溶蚀缝和岩溶角砾间的孔隙等在此阶段被泥质或有机质充填(图 2-6), 使得储集空间大幅减少, 储集物性变差。

2.4 白云石化作用

白云石化作用不仅为雷口坡组优质储层的形成奠定了基础, 还产生了一定数量的储集空间。通过岩石学特征分析, 认为研究区白云石化发生于同生-准同生成岩阶段, 成因有回流渗透白云石化和混合水白云石化。

回流渗透白云石化产生于低能的局限台地环境中, 强烈的蒸发作用导致重盐度卤水下沉并交代海底沉积物, 从而发生白云石化作用, 形成的白云石以泥-粉晶为主, 晶粒细小, 晶形差, 说明白云岩形成时间早, 结晶速度快, 在准同生期就发生了白云石化作用。该类白云岩中石膏假晶发育, 反映高盐度、高 Mg/Ca 比值的海水特征, 是与蒸发泵作用有关的回流渗透白云石化的产物^[10]。该类白云岩经后期成岩作用改造, 具有一定的储集性能。

图 3 川中龙岗—营山地区雷四³亚段混合水白云石化模式Fig.3 Model of mixed water dolomitization on the Middle Triassic Leikoupo-4³ Formation in Longgang-Yingshan area of central Sichuan basin

混合水白云石化产生于高能颗粒滩环境中,由于古地形隆起和颗粒滩快速加积作用,颗粒滩常暴露于海平面之上,受到大气淡水的影响,造成大气淡水和海水的混合,从而造成混合水白云石化,形成鲕粒白云岩和砂屑白云岩等(图 3)。该类白云石晶体粗大,半自形-他形为主,结构较单一,晶粒内多含包裹体而呈雾状,岩石原岩结构多被破坏,部分保留颗粒残余结构。该类白云岩受淡水溶蚀作用的影响,可形成粒内溶孔、粒间溶孔及晶间溶孔,储集物性好。

2.5 溶蚀作用

溶蚀作用是改善碳酸盐岩储层孔渗性能的一种建设性成岩作用^[11],是区内雷四³亚段白云岩中储集空间形成的主要因素。详细的岩心和薄片观察分析表明溶蚀作用发生在同生-准同生期、表生期和埋藏期。

同生-准同生期溶蚀作用发生于大气淡水成岩环境,颗粒滩在潮湿多雨气候下,接受大气淡水和混合水的改造,发生显著的选择性与非选择性溶蚀作用,形成粒内溶孔、粒间溶孔、晶间溶孔以及不规则溶缝等。该期溶蚀作用规模小、发生时间早,形成的粒间溶孔、晶间溶孔和溶缝等在后来压实和胶结等成岩作用的改造下基本消失,对现今储集空间的影响不大。

表生期溶蚀作用发生于中三叠世末期,在印支运动影响下,四川盆地整体抬升,海水由北向南退出四川盆地,雷口坡组长期暴露于海平面之上,进入了长达数万年的表生成岩阶段^[12]。该期溶蚀作用使研究区雷口坡组雷四³亚段顶部发育较多大小不一的溶蚀孔洞(图 2-7),可见大量的岩溶角砾白云岩,在

钻井过程中出现泥浆的漏失等,它对储集空间是建设性作用的,是研究区雷四³亚段储层发育的有利条件。

埋藏期溶蚀作用发生于中-深埋藏阶段,与烃源岩成熟期释放出有机酸及液态烃向气态烃转化过程中释放出大量的富有机酸及相关的 CO₂、H₂S 等腐蚀性组分有关^[13-14]。在温度 >120℃ 时,来自上覆地层须家河组的烃类与雷口坡组的硫酸盐矿物发生热化学还原作用,产生富含 H₂S、CO₂ 和草酸等腐蚀性物质^[15],当这些组分随着地层水沿早期地层薄弱部位运移时,粒间孔、缝合线和构造缝等不稳定组分被溶蚀,形成不规则的粒间溶孔、粒内溶孔和溶蚀扩大缝(图 2-8)等。该期溶蚀作用改善了原有孔隙的储集性能,为油气运移提供了更多的有效通道。

2.6 构造破裂作用

研究层段的构造破裂作用按形成时间和成因大致可分为早、晚两期张性裂缝。早期张性裂缝均已被方解石和石膏充填。晚期张性裂缝未被完全充填(图 2-9),形成的微裂缝为现今储层中的流体有效通道及气藏的储集空间,该期裂缝穿插前述所有的成岩作用产物,形成时间最晚,对气藏储集空间的连通起到了重要作用。

3 成岩过程中孔隙的形成与演化

在上述成岩作用与储集空间关系研究的基础上,结合前人的研究成果,根据成岩和孔隙演化可将成岩阶段划分为早成岩、中成岩、晚成岩 3 个阶段(图 4)。

3.1 早成岩阶段

龙岗—营山地区中三叠统雷口坡组雷四³亚段

沉积的局限高能地带,水动力作用强,主要堆积由砂屑组成的颗粒滩,其原生孔隙度一般为30%~40%。经海底同生阶段的纤状-马牙状的文石、高镁方解石胶结后,原生孔隙有较大程度的缩小,其孔隙度一般小于20%,形成弱固结-半固结的泥亮晶砂屑白云岩、泥晶灰岩等。这类滩体形成的水体较浅,在海平面升降作用的影响下,频繁短时间暴露于水体之上,受到大气淡水和混合水的改造,发生混合水白云化作用、大气淡水淋溶作用及重结晶作用后,颗粒多被白云岩化,胶结物由纤状文石、方解石转变成为刃状、等轴粒状白云石,形成等厚环边,形成砂屑白云岩、泥-粉晶白云岩、鲕粒白云岩和藻纹层白云岩等,产生较多的晶间孔、粒内溶孔及少量小溶孔、溶洞和溶缝等,使孔隙度可增高至25%~30%;此后,便进入了漫长的埋藏成岩过程。

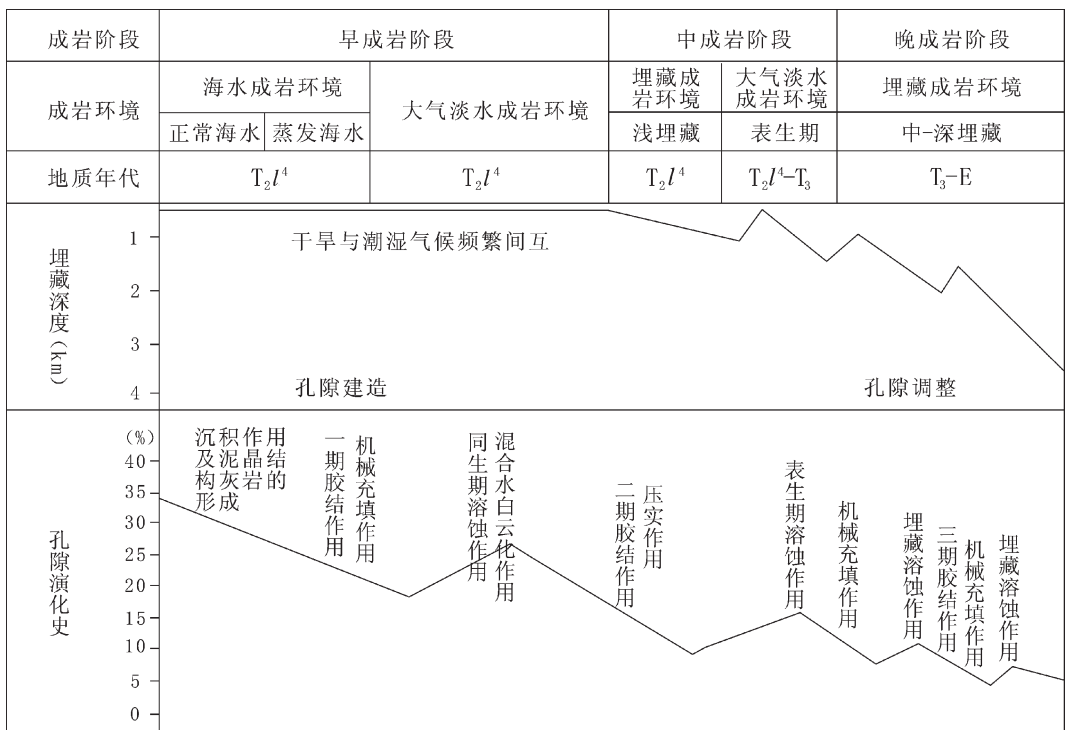
3.2 中成岩阶段

随上覆地层的沉积,到印支早期,已固结的颗粒滩进入浅埋藏阶段,受压实作用的影响,颗粒发生重新排列,孔隙的渗滤通道缩小,甚至消失,形成一系

列的孤立孔隙,导致孔隙流体的物质交换不畅,成岩作用减弱,残余粒间孔得以保存。另外,浅埋藏阶段压实成岩流体,导致粒间连晶、多晶和鳞片状石膏等的胶结,使早期原生孔隙大量消失,残存的孔隙度一般小于10%,岩石基本固结成岩。印支中-晚期,四川盆地整体抬升,海水从北至南先后退出盆地,研究区进入表生阶段,颗粒滩接受近地表大气淡水的改造,发生岩溶作用,形成岩溶角砾白云岩。先前残留下来的孔隙经强烈的溶蚀作用后形成丰富的粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔和溶蚀洞缝,这些孔隙虽局部被机械碎屑、渗流粉砂充填,但保留的孔隙度一般在10%~20%。

3.2 晚成岩阶段

随着地壳的下降,上覆沉积物的再次堆积,龙岗-营山地区雷四³亚段滩体进入埋藏阶段。一方面,压实溶作用导致部分次生孔隙的缩小;另一方面,粗-巨晶方解石开始大量沉淀,充填于早期次生孔隙之中,使得孔隙度降低至8%以下。随着埋藏深度的进一步增加,雷口坡组和上覆须家河组地层中



注: T₂l⁴-中三叠世雷四期; T₃-晚三叠世; E-古近纪

图4 川中龙岗-营山地区中三叠统雷口坡组雷四³亚段储层孔隙演化图

Fig.4 Reservoir pore evolution model of Middle Triassic Leikoupo-4³ Formation in Longgang-Yingshan area of central Sichuan basin

Note: T2l4-4th submember of Middle Triassic Leikoupo Formation; T3-Upper Triassic; E-Eogene

的有机质开始向液态烃和气态烃转变,与之伴生的各种有机酸、CO₂和H₂S进入地层水,当这种具有腐蚀性的地层水沿早期地层薄弱部位,如雷四³亚段滩体中的溶孔和裂缝运移时,可导致粗-巨晶方解石重新溶解,形成大量的粒间溶孔和晶间溶孔等次生孔隙,孔隙度增加1%~2%。同时,燕山—喜山期的构造运动使地层褶皱抬升,导致构造破裂和气烃再次发生运移和聚集,形成晚期高角度构造缝,发生进一步的溶蚀作用,对储层的孔、渗性有一定的改造作用,此时孔隙度为4%~10%,孔隙类型以粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔和溶蚀缝为主,形成现今的中低孔、中高渗的孔隙型或裂缝-孔隙型储层。

4 结论

1)成岩作用控制着龙岗—营山地区雷口坡组雷四³亚段储层的储集空间类型及其演化,破坏性成岩作用主要有压实压溶、胶结和机械充填作用,建设性成岩作用主要有混合水白云石化、溶解和破裂作用。

2)多期次的方解石、白云石及石膏胶结,几乎充填了所有的原生孔隙和大部分次生孔隙。混合水白云石化、表生期和埋藏期溶蚀对储层的储集空间贡献最大,产生的粒内溶孔、粒间溶孔和溶蚀扩大缝成为现今储层的主要储集空间。

3)成岩作用的选择性决定了储层的非均质性,系统研究其成岩作用类型、特征及与储集空间的关系,认识储层演化过程,有利于弄清储集空间的展布规律,提高勘探开发效益。

参考文献(References):

- [1] 张云峰,李忠,王清晨,等.鲁西隆起区奥陶系碳酸盐岩成岩作用及其对储集性的控制作用[J].地质科学,2005,40(2):207-219.
Zhang Yunfeng, Li Zhong, Wang Qingchen, et al. Diagenesis and its role on the reservoir of Ordovician carbonate rocks in the West Shandong Rise[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2):207-219(in Chinese with English abstract).
- [2] 黄文明,刘树根,张长俊,等.四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理[J].石油与天然气地质,2009,30(5):566-575.
Huang Wenming, Liu Shugen, Zhang Changjun, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the high quality Cambrian reservoirs in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5):566-575(in Chinese with English abstract).
- [3] 高林.碳酸盐岩成岩史及其对储层的控制作用—以普光气田为例[J].石油与天然气地质,2008,29(6):733-739.
Gao Lin. Diagenesis of carbonate rocks and their control over

- reservoirs—an example from the Puguang gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6):733-739(in Chinese with English abstract).
- [4] 郭彤楼.川东北地区飞仙关组鲕滩储层成岩作用—以宣汉-达县及元坝区块为例[J].石油与天然气地质,2010,31(5):620-631.
Guo Tonglou. Diagenesis of the Feixianguan oolitic shoal reservoirs in the northeastern Sichuan Basin—examples from Xuanhan - Daxian and Yuanba areas [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5):620-631(in Chinese with English abstract).
- [5] 冯增昭,鲍志东,李尚武,等.中国南方早中三叠世岩相古地理[M].北京:石油工业出版社,1997:18-24.
Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Li Shangwu, et al. Lithofacies and Paleogeography of Early and Middle Triassic in South of China [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1997:18-24 (in Chinese with English abstract).
- [6] Anjos S M C, De Ros L F, De Souza R S, et al. Depositional and diagenetic control on the reservoir quality of Lower Cretaceous Penedencia sandstones, Potiguar rift basin Brazil [J]. AAPG Bulletin. 2000, 84(11):1719-1742.
- [7] 蒋志斌,王兴志,曾德铭,等.川西北下二叠统栖霞组有利成岩作用与孔隙演化[J].中国地质,2009,26(1):101-109.
Jiang Zhibin, Wang Xingzhi, Zeng Deming, et al. Favorable diagenesis and pore evolution in the Xixia Formation in lower Permian in northeastern Sichuan [J]. Geology in China, 2009, 26(1):101-109(in Chinese with English abstract).
- [8] 李金梅,巩恩普,孙宝亮,等.黔南晚石炭世叶状藻礁灰岩的成岩作用[J].世界地质,2009,28(1):11-19.
Li Jinmei, Gong Enpu, Sun Baoliang, et al. Diagenesis of Late Carboniferous phylloid algal reefs in southern Guizhou [J]. Global Geology, 2009, 28(1):11-19(in Chinese with English abstract).
- [9] 王伟,王兴志,张帆,等.四川广安地区须家河组四段储层成岩作用与孔隙演化[J].世界地质,2010,29(1):96-103.
Wang Wei, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. Diagenesis and pore evolution of reservoir in the 4th Member of Xujiahe Formation in Guangan area of Sichuan Province [J]. Global Geology, 2010, 29(1):96-103(in Chinese with English abstract).
- [10] 杨雨,王一刚,文应初,等.川东北飞仙关组沉积相与鲕滩气藏的分布[J].天然气勘探与开发,2001,24(3):18-21.
Yang yu, Wang Yigang, Wen Yingchu, et al. Distribution of Feixianguan sedimentary facies and oolitic bank gas reservoir in southeastern Sichuan[J]. Natural Gas Exploration and Development. 2001, 24(3):18-21(in Chinese with English abstract).
- [11] 王英华.沉积学及岩相古地理学新进展[M].北京:石油工业出版社,1995.
Wang Yinghua. New Progress of Sedimentology and Lithofacies Paleogeography [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1995 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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, Zhangfan, 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 (in Chinese with English abstract).
- [13] Dravis J J, Muir I D. Dolomite reservoirs created by burial dolomite dissolution: The Keg River case study, Comet Platform area, Rainbow Basin, NW Alberta [C]//Packard J and Davies G (eds). *Dolomites, the Spectrum: Mechanisms, Models, Reservoir Development: Canadian Society of Petroleum Geology Core Conference, CD volume, Calgary, 2004*:58.
- [14] Dravis J J. Deep-burial microporosity in Upper Jurassic Haynesville oolitic grainstones, east Texas [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 63: 325-341.
- [15] Machel H G, Krousc H R, Sassen R. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction [J]. *Applied Geochemistry*, 1995, 10(4):373-389.

Reservoir diagenesis and porosity evolution of Leikoupo-4³ Formation in Longgang-Yingshan area of central Sichuan Basin

WU Shi-jiu¹, ZENG De-ming¹, WANG Xin-zhi¹, LI Shun², CHEN Hu³, WANG Yan⁴

(1. *State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploration, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China*;
2. *Middle Sichuan Gas Fields, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Suining 629000, Sichuan, China*; 3. *Northwest Sichuan Gas Fields, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Jiangyou 621709, Sichuan, China*; 4. *Project Monitoring Centre of Southwest Oil and Gas Company of SNC, Deyang 618000, Sichuan, China*)

Abstract: Good reservoirs are developed in the Middle Triassic Leikoupo-4³ Formation in Longgang-Yingshan area of central Sichuan basin. There exist rich oil and gas resources in granular dolomite, suggesting good exploration prospect. Through macro- and micro- observation of thin sections and rocks from more than ten wells in combination with geochemical characteristics, the authors made a detailed investigation into diagenetic types and characteristics and examined the relationship between the diagenesis and the evolution of reservoir space. The findings show that the diagenetic evolution process of reservoir in the Middle Triassic Leikoupo-4³ Formation in Longgang-Yingshan area of central Sichuan basin was complex, and during this process various diagenetic actions were developed, with the reservoir quality being clearly affected by the diagenesis. The compaction and pressure solution, multiphase cementation and multiphase packing action resulted in substantial reduction of intergranular pores and intercrystalline pores. The mixed water dolomitization, the supergene and burial dissolution and the tectonic disruption constituted the keys to the formation of high quality reservoir and the generation of massive intergranular dissolution pores, intragranular dissolution pores, intercrystalline dissolved pores and eroded fissures, which have now become the main oil and gas reservoir space.

Key words: diagenesis; reservoir; reservoir space; Leikoupo Formation; Longgang-Yingshan area

About the first author: WU Shi-jiu, male, born in 1986, master candidate, majors in sedimentology and reservoir geology; E-mail: 857711480@qq.com.