

川中高石梯地区龙王庙组深层白云岩孔隙类型、成因及演化

何溥为¹, 屈海洲^{2,3*}, 杨航¹, 孙启蒙¹, 张兴宇³, 宁科科³, 李泯星³, 曾浩³, 何云恒³, 颜赞旭³, 郭玉凤³

¹中国石油西南油气田分公司, 四川 成都

²油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都

³西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

Email: hebwei@petrochina.com.cn, *quhaizhou@swpu.edu.cn

收稿日期: 2020年11月5日; 录用日期: 2020年11月19日; 发布日期: 2020年11月26日

摘要

川中高石梯地区寒武系龙王庙组是四川盆地天然气勘探生产的重要层位。根据岩心、薄片等资料, 对高石梯地区龙王庙组深层白云岩孔隙类型、成因以及其演化进行了研究。龙王庙组白云岩宏观储集空间类型主要有溶蚀孔洞、裂缝, 微观储集空间主要有原生的晶间孔、次生的粒间溶孔、晶间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、微裂缝等。龙王庙组主要成岩作用经历了同生成岩阶段的胶结作用、白云石化作用、大气淡水溶蚀作用, 初次埋藏阶段的压实作用、压溶作用、溶蚀作用、白云石胶结作用, 表生成岩阶段的顺层岩溶作用, 二次埋藏阶段的胶结作用、构造破裂作用、溶蚀作用、热液作用等。其中, 控制有效孔隙的关键因素是沉积微地貌与同生成岩阶段的白云石化、大气水溶蚀作用的匹配关系, 岩溶作用及埋藏期的溶蚀-热液作用等控制作用次之。

关键词

孔隙演化, 孔隙成因, 孔隙类型, 龙王庙组, 川中高石梯地区

Porosity Types, Origin and Evolution of Deep-Dolostone of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the Gaoshiti Area in Central Part of Sichuan Basin, SW China

Buwei He¹, Haizhou Qu^{2,3*}, Hang Yang¹, Qimeng Sun¹, Xingyu Zhang³, Keke Ning³, Minxing Li³, Hao Zeng³, Yunheng He³, Zanzu Yan³, Yufeng Guo³

*通讯作者。

文章引用: 何溥为, 屈海洲, 杨航, 孙启蒙, 张兴宇, 宁科科, 李泯星, 曾浩, 何云恒, 颜赞旭, 郭玉凤. 川中高石梯地区龙王庙组深层白云岩孔隙类型、成因及演化[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(11): 1075-1084. DOI: 10.12677/ag.2020.1011106

¹Petrochina Southwest Oil and Gas field company, Chengdu Sichuan

²State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu Sichuan

³School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Email: hebwei@petrochina.com.cn, *quhaizhou@swpu.edu.cn

Received: Nov. 5th, 2020; accepted: Nov. 19th, 2020; published: Nov. 26th, 2020

Abstract

The Cambrian Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, central Sichuan Basin, is an important horizon for oil and gas exploration and research. According to the cores, thin-sections and logging data, researches have been done in terms of the deep dolomitic pore types, formation mechanism and evolution. The main macroscopic pore type in Longwangmiao Formation can be divided into dissolved vug and fissures. The microscopic pore types can be divided into primary intercrystalline pores, secondary intracrystalline dissolved pores, intergranular dissolved pores, intercrystalline dissolved pores and microfissures. In the syndiagenetic stage, the diagenesis underwent cementation, dolomitization, atmospheric freshwater dissolution. In the primary burial stage, it underwent compaction, pressure solution, dissolution and dolomitic cementation. In the supergene stage, it underwent parallel karstification, secondary burial cementation, tectonic fracturing, dissolution and hydrothermalism. Among these diagenesis, the critical factor controlling the effective pores is the matching relation between sedimentary microtopography and syndiagenetic dolomitization and atmospheric freshwater dissolution, followed by karstification and dissolution-hydrothermalism of the burial period.

Keywords

Porosity Evolution, Porosity Origin, Porosity Types, Longwangmiao Formation, Gaoshiti Area in Central Part of Sichuan Basin

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国油气田的勘探开发由浅层过渡到深层, 深层油气储集层的研究成为新的研究热点[1] [2] [3], 深层碳酸盐岩孔隙类型、形成保存机制以及对成储潜力, 仍有待系统研究[4]-[17]。2014年, 四川盆地川中地区的磨溪区块寒武系龙王庙组气藏年产气 10 亿立方米的试采工程已经投入运行, 龙王庙组成为了四川盆地内的重要产气层位, 拥有巨大的勘探潜力[18] [19]。前人研究表明, 川中地区龙王庙组主要以蒸发一局限台地相为主, 台内滩大面积发育, 相邻地区则主要发育潟湖、云坪等, 滩相白云岩的油气勘探潜力巨大[18]-[25]。因此, 在毗邻磨溪区块的高石梯地区, 对开展龙王庙组深层白云岩孔隙类型、成因以及其演化进行了研究, 对于该地区的增储上产, 具有重要的意义[26]。

2. 地质背景

川中的乐山 - 龙女寺古隆起的雏形始于四川盆地的桐湾运动, 早寒武世四川盆地在川中地区发育了近南北向的裂隙凹槽, 裂隙凹槽的台缘带即古隆起的雏形; 志留纪末期到二叠系以前, 加里东运动使古隆起整体抬升接受剥蚀, 从而形成了乐山 - 龙女寺古隆起的主体; 晚白垩世, 四川盆地整体发生隆升,

究区内粒间溶孔主要发育在白云岩化作用不完全的残余砂屑云岩中。粒间溶孔是高石梯地区龙王庙组油气的主要储集空间。

5) 晶间孔

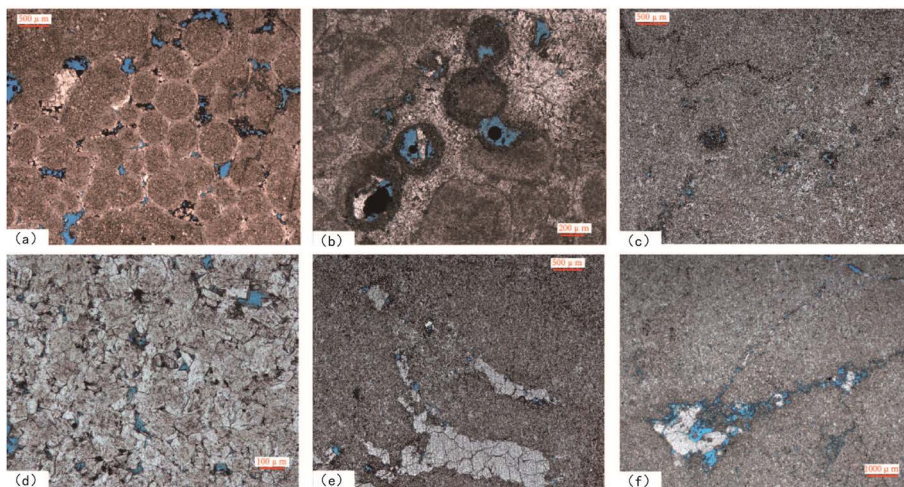
晶间孔是在白云石矿物之间的原生孔隙(图 3(d)、图 3(e)), 矿物的边缘较平直规则。晶间孔孔径一般为 0.01~1.6 mm, 被白云石胶结物、石英、沥青质等部分 - 全充填。研究区内晶间孔多发育在粉晶、细晶白云岩中。



a) 孔洞, 直径 1~15 mm, 被白云石部分充填, 砂屑云岩, 高石 23 井, 第 8 筒 3 块岩心; b) 孔洞, 局部可见裂缝扩溶特征, 被白云石、石英部分充填, 砂屑云岩, 高石 23 井, 第 4 筒 35 块岩心; c) 蜂窝状溶蚀孔洞, 成层状分布, 砂屑云岩, 高石 001-X24 井, 4957.61m, 第 2 筒 44 块岩心; d) 针状溶孔, 孔径 0.2~1 mm, 可见沥青质充填的缝合线, 鲕粒云岩, 高石 23 井, 第 3 筒 38 块岩心; e) 白云石部分充填的针状溶孔, 孔径 0.2~2 mm, 发育一条白云石部分充填的构造缝, 砂屑云岩, 高石 7 井, 第 1 筒 5 块岩心; f) 斜交状构造缝, 白云石全充填, 局部可见针状溶孔, 高石 11 井, 砂屑云岩, 第 1 筒 138 块岩心。

Figure 2. Macro-reservoir space characteristics on the core of Longwangmiao Formation in the study area

图 2. 研究区龙王庙组岩心上宏观储集空间特征



a) 粒间溶孔, 沥青部分充填, GS6 井, 4545.49 m, (-); b) 粒内溶孔、铸模孔, 石英、沥青部分充填, GS7 井, 4637.52 m, (-); c) 藻砂屑的粒内溶孔, GS17, 4471.71-88 m, (-); d) 晶间孔、晶间溶孔, GS11 井, 4571.57 m, (-); e) 晶间孔、晶间溶孔, GS17, 4464.19 m, (-); f) 裂缝, 溶蚀扩大并形成溶孔, 被石英白云石部分充填, GS23 井, 4668.38 m, (-)。

Figure 3. Types and characteristics of micro-pores in the Longwangmiao Formation dolomite in the study area

图 3. 研究区龙王庙组白云岩微观孔隙类型及特征

6) 晶间溶孔

晶间溶孔是白云石晶粒之间的晶间孔受到溶蚀作用而形成的(图 3(d)、图 3(e))。研究区龙王庙组晶间溶孔较发育, 孔径一般为 0.05~0.2 mm, 被沥青质、白云石、石英等部分或者全充填。主要发育在粉晶、细晶白云岩中。

4. 孔隙成因

4.1. 岩石类型

龙王庙组孔隙发育的有利岩性主要是鲕粒云岩、残余砂屑云岩, 其次是细-中晶云岩、含残余砂屑的细-中晶云岩、含晶粒的残余砂屑云岩, 而泥、粉晶等晶粒云岩等的孔隙发育程度较差(图 4、图 5)。

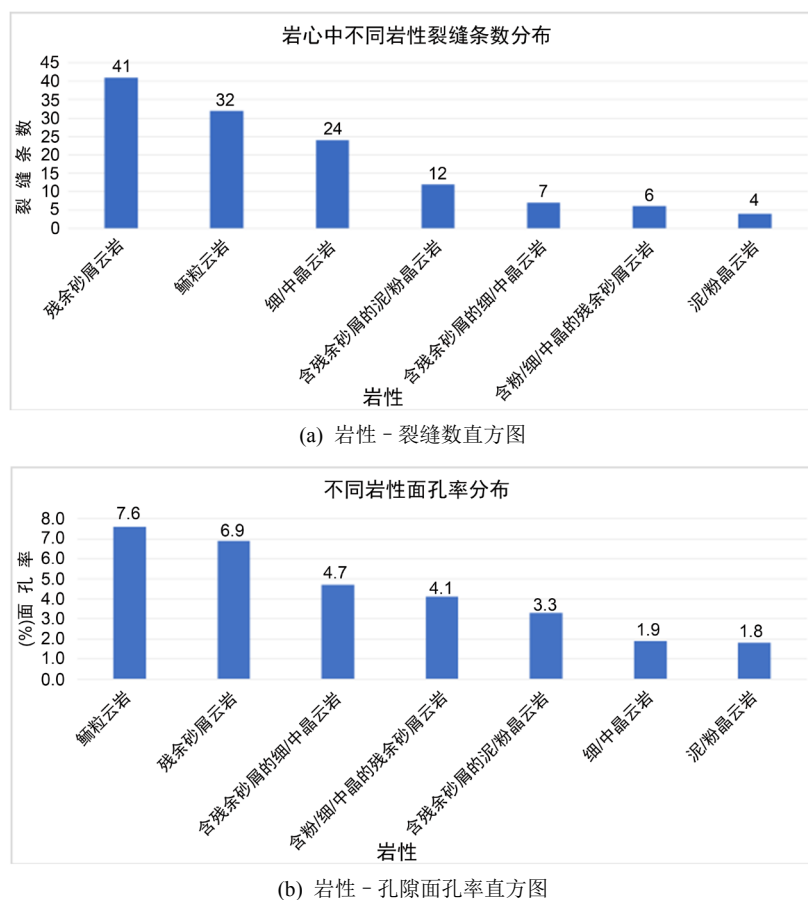


Figure 4. Histogram of the distribution of fractures and pores with different lithologies in the Longwangmiao Formation (statistical core is about 400 m, and about 200 slices)

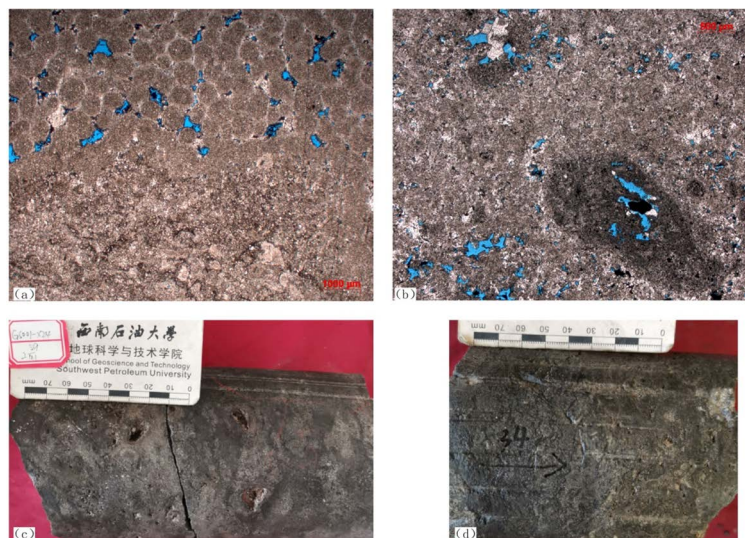
图 4. 龙王庙组不同岩性的裂缝及孔隙面孔率分布直方图(统计岩心约 400 m、薄片约 200 张)

1) 鲕粒云岩

鲕粒云岩孔隙主要以粒间溶孔为主, 少量粒内溶孔, 大量鲕粒内部被白云石化或被白云石胶结物充填, 以他形晶为主, 少量半自形晶, 鲕粒之间多为亮晶胶结物或晶粒。鲕粒的幻影结构常见。龙王庙组鲕粒云岩孔隙、裂缝均较发育, 岩心上可见 32 条裂缝, 铸体薄片可见粒间溶孔、晶间溶孔, 孔径主要为 0.1~0.5 mm, 岩心中发育溶孔, 总面孔率可达 76.4%。孔隙及裂缝部分被白云石、沥青质及少量石英部分填充, 孔缝连通性较好, 能较好提高储层孔隙度和渗透率(图 4(a)、图 4(b))。

2) 残余砂屑云岩

尤其是含有藻砂屑或者具有粘结特征的砂屑云岩,更易发育粒内溶孔、粒间溶孔,平均孔径 0.4 mm,最高可达 3 mm,平均面孔率 6%。岩心上可见 41 条裂缝,常见溶孔,尤其是有菌藻残余的组分,如形成的藻砂屑、粘结、凝块结构等,容易被溶蚀形成孔洞(图 4, 图 5(b)、图 5(d))。



a) 上部亮晶鲕粒云岩与下部含残余砂屑粉晶云岩的孔隙发育差异性, GS6 井, 4545.49 m, 铸体薄片, (-); b) 残余藻砂屑粒内的粒内溶孔、粒间溶孔, GS7 井, 4634.74 m, 铸体薄片, (-); c) 藻粘结构被溶蚀形成毫米-厘米级孔洞, GS001-X24 井, 第 2 筒 59 块岩心; d) 晶间孔、晶间溶孔, GS11 井, 4571.57 m, (-); e) 凝块结构被溶蚀形成毫米级孔洞, GS23 井, 第 9 筒 34 块岩心

Figure 5. The influence of different lithological characteristics of the Longwangmiao Formation in the study area on the degree of pore development

图 5. 研究区龙王庙组不同岩性特征对孔隙发育程度的影响

4.2. 成岩作用

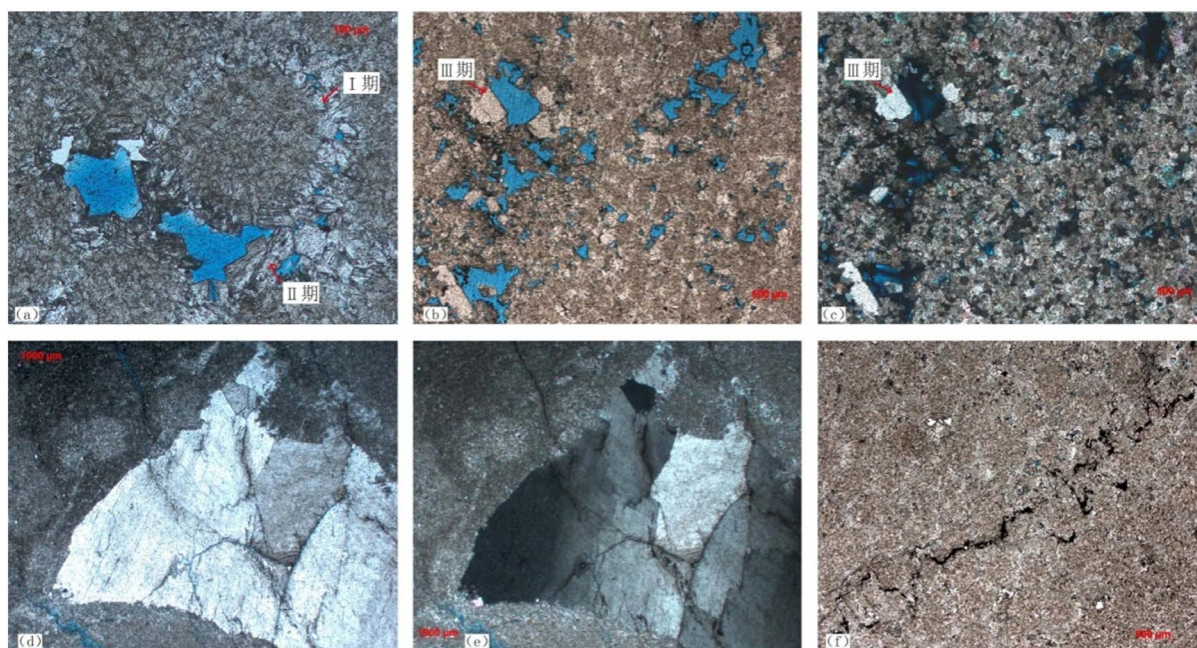
高石梯地区龙王庙组白云岩的成岩序列为: 同生成岩阶段的胶结作用、白云石化作用、大气淡水溶蚀作用, 浅埋藏阶段的压实作用、岩溶作用、白云石胶结作用, 表生成岩阶段的顺层岩溶作用, 深埋藏阶段的胶结作用、构造破裂作用、溶蚀作用、热液作用等。此外, 还有油气运移形成的沥青质充填作用。

4.2.1. 胶结作用

研究区经历了多期胶结充填作用, 根据已有岩心及薄片资料识别出 3 期胶结充填: 第 I 期海水环境的胶结作用, 形成围绕颗粒的环边胶结物, 但多被白云石化。第 II 期埋藏环境的细-中晶白云石胶结物, 一旦相互接触支撑, 可以一定程度上承受上覆岩层的压实作用等, 保护残余孔隙。但是, 如果过度胶结; 则有效减小早期孔隙。第 III 期热液作用的石英、鞍状白云石等胶结物, 与早期胶结物不整合接触, 明显降低了岩石孔隙度(图 6(a)~(e))。

4.2.2. 白云石化作用

高石梯龙王庙组经历了多期的白云石化作用, 其中同生成岩阶段的蒸发泵和渗透回流白云石作用有利于形成早期孔隙, 埋藏期的白云石化和热液白云石化作用, 会导致岩石的过度白云石化, 即在先期白云石基础上, 形成白云石胶结物, 减小岩石孔隙(图 6(d)、图 6(e))。整体而言, 白云石作用有利于孔隙形成, 但是过度白云石化则会减小岩石孔隙。



a) 溶蚀作用形成残余鲕粒之间的粒间溶孔，海底环边胶结物的结构仍被保留，埋藏期胶结作用形成的自形中晶白云石，GS11 井，4592.68 m，铸体薄片，(-)；b) 具粘结特征的残余砂屑云岩的粒间溶孔发育，被中粗晶的白云石、石英、沥青等部分胶结，GS001-X24 井，4634.74 m，铸体薄片，(-)；c) 为 b 视域的正交光下特征，可见白云石、石英等矿物不同干涉色；d) 孔洞中自形粗晶白云石、鞍状巨晶白云石等胶结物，GS17 井，gs17-4469.03 m，(-)；e) 为 d 视域的正交光下特征，鞍状白云石具波状消光特征；f) 压溶作用形成的缝合线，被沥青质充填。

Figure 6. The influence of Longwangmiao formation on pore development in the study area

图 6. 研究区龙王庙组成岩作用对孔隙发育的影响

4.2.3. 压实及压溶作用

压实作用不同阶段的孔隙度损失量不同，在浅埋藏期，压实作用使原生粒间孔大量减少，颗粒拉长变形呈定向排列，少数颗粒破碎。到中埋藏阶段，在高温高压作用下，压实作用主要使颗粒接触部位发生溶解，形成缝合线构造，对孔隙度的影响较小，可增加渗透性。研究区龙王庙组缝合线常见，多被沥青、白云石等充填物(图 6(f))。

4.2.4. 溶蚀或岩溶作用

溶蚀或岩溶作用是碳酸盐岩增加储渗性能的最好。结合岩心和铸体观察，认为研究区龙王庙组储集层经历了 3 期溶蚀改造，分别为同生成岩阶段的大气淡水溶蚀作用，表生成岩阶段的岩溶作用及中 - 深埋藏溶蚀作用(图 6(a)、图 6(b))。

1) 同生成岩阶段的大气水溶蚀作用

海水环境碳酸盐岩沉积物主要是文石和高镁方解石，它们在海底环境中是稳定矿物，但当相对海平面下降，使得它们暴露于大气淡水环境中，则处于不稳定状态，容易使得原始沉积结构发生选择性溶蚀作用，形成粒内溶孔、铸模孔、粒间溶孔、晶间溶孔等(图 3(a)、图 3(b)、图 5(a)、图 5(b))。

2) 表生岩溶作用

加里东末期，乐山—龙女寺古隆起碳酸盐岩地层被整体抬升至地表—近地表环境，表生岩溶水沿研究区西北部龙王庙组露头区顺层运移或者由区内高台组剥蚀区下渗，发生顺层的岩溶作用，虽然无法在研究区的龙王庙组中形成“厅堂型”的岩溶缝洞，但是仍可以形成大量未充填 - 半充填顺层囊状、不规则状的宏观溶蚀孔洞，显著提高岩石的储集能力(图 5(c))。

3) 中 - 深埋藏溶蚀作用

该阶段的溶蚀作用，主要沿着先期的孔缝体系进行，即先期的各种基质孔隙、岩溶孔洞，尤其是有效的裂缝体系，在靠近流体来源的部位发生溶蚀增孔效应，而在较远部位则发生沉淀胶结的减孔效应，即前者表现为孔缝或其内先期胶结物的溶蚀，后者表现为孔缝内产生新的胶结物(图 3(f)、图 7(a))。



a) 溶蚀作用是的藻砂屑或藻粘结构形成粒内溶孔，构造缝连通部分孔隙，GS23 井，4662.5m，铸体薄片，(-); b) 两期裂缝，被白云石、石英部分充填，并有扩溶特征，围岩可见毫米级溶蚀孔洞，GS001-X24，第 2 筒 18 块岩心。

Figure 7. Fracture development characteristics of Longwangmiao Formation in the study area

图 7. 研究区龙王庙组裂缝发育特征

4.3. 构造作用

龙王庙组在埋藏期经历了三次大型构造运动，分别是加里东运动、印支运动和喜马拉雅运动。加里东期构造运动产生大量斜交状的构造裂缝，且多被沥青和白云石充填；印支运动形成大量水平缝和低角度缝，伴随着下寒武统筇竹寺组烃源岩大量生烃，强酸性烃类物质进入储层裂缝，对构造裂缝及其连通的孔隙，进行溶蚀改造；喜马拉雅构造运动强烈，在研究区龙王庙组中主要产生高角度缝，延伸远，充填少，连通前期形成的裂缝及孔隙，对储层的储渗能力有重要贡献。

5. 孔隙发育模式

基于研究区龙王庙组孔隙成因的认识，结合安岳气田龙王庙组的埋藏史[24]，重建了孔隙演化模式，控制有效孔隙的关键因素是沉积微地貌与同生成岩阶段的白云石化、大气水溶蚀作用的匹配关系，岩溶作用及埋藏期的溶蚀 - 热液作用等控制作用次之。

1) 同生成岩阶段

原始沉积于浅水台地中相对较高微地貌上的颗粒岩，收到海水胶结作用，形成环边胶结物；相对海平面短暂下降时，暴露于大气水环境中，受到大气水的淋滤、溶蚀作用，形成粒内溶孔、粒间溶孔及溶蚀孔洞等。蒸发泵、渗透回流等白云石化作用，使得岩石发生白云石化，形成晶间孔等孔隙。这些早期的组构选择性孔隙是形成储集层的重要基础(图 8(a)、图 8(b))。

2) 初次埋藏阶段

随着上覆沉积物逐渐增厚和沉积物逐渐脱离海水环境的影响，龙王庙组开始进入埋藏环境，至志留纪末期，龙王庙组达到第一次最大埋藏深度。这期间龙王庙组受到压实、胶结、等成岩作用，使得岩石孔隙度迅速下降，压溶、白云石化作用则增加了一定孔隙度，但是，部分砂屑等颗粒，受持续的白云石化等作用，而形成具残余颗粒结构的晶粒白云岩。构造破裂作用形成的裂缝，可见被角砾、白云石充填的特征，有效性较差(图 8(c))。

3) 表生成岩阶段

峨边 - 安岳 - 遂宁 - 江油以西地区的寒武系 - 奥陶系被剥蚀, 该期不整合岩溶作用, 对距离相对较远的高石梯地区的龙王庙组的影响相对较弱, 钻井未遇到大型缝洞体, 顶部岩心尚未见到典型的喀斯特作用特征, 仅对西部地区部分孔洞形成了渗流粉砂。

4) 二次埋藏阶段

再次埋藏后, 主要是胶结作用、沥青充填作用、构造破裂、热液作用等对孔隙进行改造。胶结作用形成细 - 中晶白云石, 随后油气运移、氧化形成的沥青质充填, 并在随后的构造破裂中形成裂缝, 为热液流体提供运移通道, 热液作用对近源部位进行溶蚀, 形成溶孔、溶缝, 远源则形成鞍状白云石、石英等胶结物(图 8(d))。

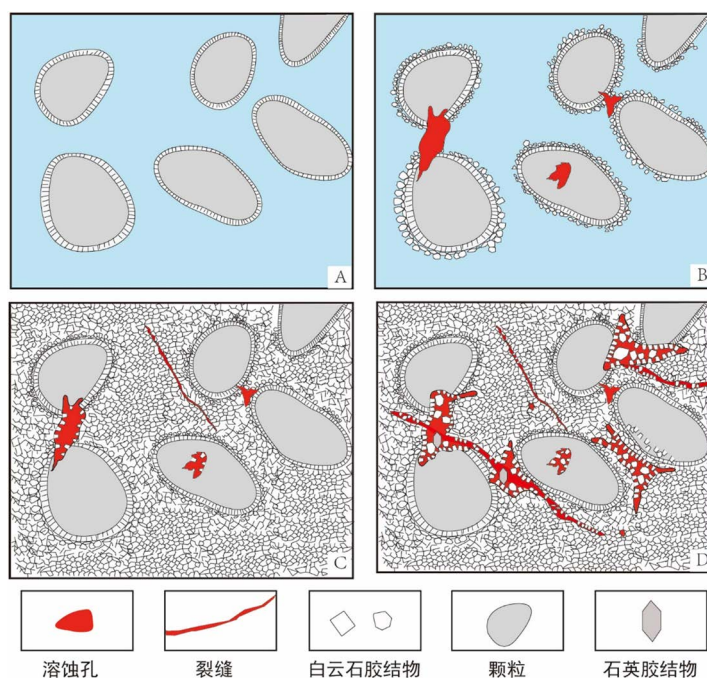


Figure 8. Pore evolution model diagram of Longwangmiao Formation

图 8. 龙王庙组孔隙演化模式图

6. 结语

1) 龙王庙组颗粒云岩、细晶云岩孔隙较发育, 主要有宏观的溶蚀孔洞、裂缝, 微观储集空间有晶间孔、粒间溶孔、晶间溶孔、粒内溶孔、铸模孔及微裂缝等。

2) 龙王庙组主要成岩作用经历了同生成岩阶段的胶结作用、白云石化作用、大气淡水溶蚀作用, 初次埋藏阶段的压实作用、压溶作用、溶蚀作用、白云石胶结作用, 表生成岩阶段的顺层岩溶作用, 二次埋藏阶段的胶结作用、构造破裂作用、溶蚀作用、热液作用等。

3) 控制有效孔隙的关键因素是沉积微地貌与同生成岩阶段的白云石化、大气水溶蚀作用的匹配关系, 岩溶作用及埋藏期的溶蚀 - 热液作用等控制作用次之。

基金项目

国家自然科学基金(41702163、41702122); 中国石油 - 西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010301)。

参考文献

- [1] 陈代钊, 钱一雄. 深层-超深层白云岩储集层: 机遇与挑战[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 187-196.
- [2] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [3] 朱光有, 孙崇浩, 赵斌, 等. 7000 m 以深超深层古老缝洞型碳酸盐岩油气储层形成、评价技术与保存下限[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(5): 587-601.
- [4] 马锋, 杨柳明, 顾家裕, 等. 世界白云岩油气田勘探综述[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 1010-1021.
- [5] 陈代钊. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储集层[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 614-622.
- [6] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 923-935.
- [7] 李红, 柳益群. “白云石(岩)问题”与湖相白云岩研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(2): 302-314.
- [8] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 52-64.
- [9] Bontognall, T.R.R., Vasconcelos, C., Warthmann, R.J., et al. (2012) Dolomite-Mediating Bacterium Isolated from the Sabkha of Abu Dhabi (UAE). *Terra Nova*, **24**, 248-254. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01065.x>
- [10] Davies, G.R. and Smith, L.B. (2006) Structurally Controlled Hydrothermal Dolomite Reservoir Facies: An Overview. *AAPG Bulletin*, **90**, 1641-1690. <https://doi.org/10.1306/05220605164>
- [11] Land, L.S. (1998) Failure to Precipitate Dolomite at 25 °C from Dilute Solution despite 1000-Fold Oversaturation after 32 Years. *Aquatic Geochemistry*, **4**, 361-368. <https://doi.org/10.1023/A:1009688315854>
- [12] Moore, T.S., Murray, R.W., Kurtz, A.C., et al. (2004) Anaerobic Methane Oxidation and the Formation of Dolomite. *Earth and Planetary Science Letters*, **229**, 141-154. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.015>
- [13] Kenward, P.A., Goldstein, R.H., González, L.A., et al. (2009) Precipitation of Low-Temperature Dolomite from an Anaerobic Microbial Consortium: The Role of Methanogenic Archaea. *Geobiology*, **7**, 556-565. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2009.00210.x>
- [14] Vasconcelos, C., Mckenzie, J.A., Bernasconi, S., et al. (1995) Microbial Mediation as a Possible Mechanism for Natural Dolomite Formation at Low Temperatures. *Nature*, **377**, 220-222. <https://doi.org/10.1038/377220a0>
- [15] Sanchez-Roman, M., Vasconcelos, C., Warthmann, R., et al. (2009) Microbial Dolomite Precipitation under Aerobic Conditions: Results from Brejo do Espinho Lagoon (Brazil) and Culture Experiments. In: *Perspectives in Carbonate Geology: A Tribute to the Career of Robert Nathan Ginsburg*, John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, 167-178. <https://doi.org/10.1002/9781444312065.ch11>
- [16] Roberts, J.A., Bennett, P.C., Gonzalez, L.A., et al. (2004) Microbial Precipitation of Dolomite in Methanogenic Groundwater. *Geology*, **32**, 277-280. <https://doi.org/10.1130/G20246.2>
- [17] Warren, J. (2000) Dolomite: Occurrence, Evolution and Economically Important Associations. *Earth-Science Reviews*, **52**, 1-81. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- [18] 杜金虎, 张宝民, 汪泽成, 等. 四川盆地下寒武统龙王庙组碳酸盐缓坡双颗粒滩沉积模式及储层成因[J]. 天然气工业, 2016, 36(6): 1-10.
- [19] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166.
- [20] 杨雪飞, 王兴志, 唐浩, 等. 四川盆地中部磨溪地区龙王庙组沉积微相研究[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 972-981.
- [21] 代林呈, 王兴志, 杜双宇, 等. 四川盆地中部龙王庙组滩相储层特征及形成机制[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 19-28.
- [22] 沈安江, 陈娅娜, 潘立银, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组沉积相与储层分布预测研究[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1176-1190.
- [23] 刘树根, 宋金民, 赵异华, 等. 四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J]. 成都理工大学学报, 2014, 41(6): 657-670.
- [24] 张建勇, 罗文军, 周进高, 等. 四川盆地安岳特大型气田下寒武统龙王庙组优质储层形成的主控因素[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2063-2074.
- [25] 赵文智, 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J]. 中国科学, 2014, 44(9): 1925-1939.
- [26] Archie, G.E. (1952) Classification of Carbonate Reservoir Rocks and Petrophysical Considerations. *AAPG Bulletin*, **36**, 278-298. <https://doi.org/10.1306/3D9343F7-16B1-11D7-8645000102C1865D>