

川中地区蓬莱气区龙王庙组储层特征及其 与磨溪—高石梯地区对比

邢凤存^{1,2,3}, 刘子琪^{1,2,3}, 钱红杉⁴, 李勇⁴, 周刚⁴, 张亚⁴,

黄茂轩⁴, 李成龙⁴, 龙虹宇⁴

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;
2. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;
3. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;
4. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610041

摘要: 川中蓬莱气区下寒武统龙王庙组钻遇良好碳酸盐岩储层, 天然气显示好, 成为继川中地区安岳大气田后龙王庙组重点勘探区之一, 但储层发育规律不明制约了勘探部署。基于最新的钻井及分析测试等资料, 系统分析了蓬莱气区龙王庙组储层特征及主控因素。研究认为, 蓬莱气区龙王庙组具有陆源碎屑与碳酸盐混合沉积背景, 储层主要分布在龙王庙组中上部; 储集岩石类型主要为(残余)颗粒白云岩和结晶白云岩; 储集空间类型主要为粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔及微裂缝; 以低孔低渗储层为主, 储层厚度主要介于10~42 m之间。储层发育受控于层序地层、岩性及成岩作用等, 进积型准层序组和准层序中上部的(残余)颗粒白云岩和结晶白云岩是储层发育主要部位, 大气淡水溶蚀、油气溶蚀作用及破裂作用是核心建设性成岩作用。对比安岳大气田主体区磨溪—高石梯地区, 认为储层主控因素相近, 主要受颗粒白云岩、溶蚀作用、破裂作用等控制, 但蓬莱气区龙王庙组储层具有灰质含量高、陆源碎屑含量多、准同生期暴露弱等特点, 寻找准同生期暴露的高能颗粒白云岩和细晶白云岩及表生岩溶改造的白云岩是蓬莱气区重点关注的储层目标。

关键词: 储层特征; 主控因素; 龙王庙组; 下寒武统; 蓬莱气区; 磨溪—高石梯地区; 川中地区

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

Characteristics of Longwangmiao reservoirs in Penglai gas area and comparison with those in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin

XING Fengcun^{1,2,3}, LIU Ziqi^{1,2,3}, QIAN Hongshan⁴, LI Yong⁴, ZHOU Gang⁴, ZHANG Ya⁴, HUANG
Maoxuan⁴, LI Chenglong⁴, LONG Hongyu⁴

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
3. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
4. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: The Longwangmiao Formation in the Penglai gas area has encountered good carbonate reservoirs and good gas shows. It has become one of the key exploration areas of the Longwangmiao Formation after the Anyue gas field in the central Sichuan area. However, the unclear reservoir development law restricts exploration deployment. Based on the latest drilling and testing data, the reservoir characteristics and main controlling factors of Longwangmiao Formation in Penglai gas area are systematically analyzed. The study shows that the Longwangmiao Formation in Penglai gas area has a mixed sedimentary background of terrigenous debris and carbonate, and the reservoirs are mainly distributed in the upper part of the

收稿日期(Received): 2023-06-19.

作者简介: 邢凤存(1978—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事沉积学、油气储层地质学等方面的教学和科研工作。E-mail: xingfengcun@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金“川东北早三叠世飞仙关期同期多排碳酸盐台缘带不对称沉积结构及成因”(41302089)和“川北江油—剑阁地区早三叠世近源重力流滑塌砾石早期白云石化记录及其地质意义”(41672103)联合资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Longwangmiao Formation. The reservoir rock types are mainly (residual) granular dolomite and crystalline dolomite. The reservoir space types are mainly intergranular dissolved pores, intragranular dissolved pores, intercrystalline dissolved pores and microfractures. The reservoir is mainly composed of low porosity and low permeability reservoirs, and the reservoir thickness is mainly between 10-42 m. Reservoir development is controlled by sequence stratigraphy, lithology and diagenesis. The (residual) granular dolomite and crystalline dolomite in the middle and upper parts of the progradational parasequence set and parasequence are the main parts of reservoir development. Atmospheric freshwater dissolution, oil and gas dissolution and fracture are the core constructive diagenesis. Compared with the Moxi-Gaoshiti area in the main area of Anyue gas field, it is considered that the main controlling factors of the reservoir are similar, which are mainly controlled by granular dolomite, dissolution and fracturing. However, the Longwangmiao Formation reservoir in Penglai gas area has the characteristics of high ash content, high terrigenous clastic content and weak penecontemporaneous exposure. Looking for high-energy granular dolomite and fine-grained dolomite exposed in the penecontemporaneous period and dolomite modified by supergene karst are the key reservoir targets in Penglai gas area.

Key words: reservoir characteristics; main controlling factors; Longwangmiao Formation; Penglai gas area; Moxi-Gaoshiti area; central Sichuan region

四川盆地川中地区安岳大气田的发现是中国天然气勘探新的历史突破, 其下寒武统龙王庙组已提交探明天然气地质储量 $4\ 403.8 \times 10^8\ \text{m}^3$ ^[1-3], 主要为浅水高能环境下形成的白云石化颗粒滩储层^[4], 是迄今为止中国最大的整装碳酸盐岩天然气藏^[2,5-7], 指示了龙王庙组良好的油气勘探潜力。随着勘探深入, 寻找新的突破区块成为关注点之一^[8]。筲竹寺组烃源岩发育的德阳—安岳裂陷槽(或称为绵阳—长宁拉张槽^[9])两侧成为重点关注区, 尤其以北斜坡备受关注^[8,10]。前人对四川盆地龙王庙组气藏储层的研究主要集中在磨溪—高石梯区块, 大量学者对其储层特征、成因机制以及主控因素都进行了较为详尽的研究, 认为川中地区龙王庙组主要为滩相白云岩储层, 针孔、海绵状“花斑”岩溶系统极大改善了该地区储层质量^[11-15]。近期, 在安岳大气田北部蓬莱气区, 多口钻井钻遇了龙王庙组, 揭示了良好的碳酸盐岩储层发育条件, 天然气显示良好, 有望成为龙王庙组油气勘探突破区, 但现有钻井初步揭示蓬莱气区储层发育条件与安岳大气田具有差异性。前人针对安岳大气田龙王庙组储层做了系统研究, 而针对蓬莱气区龙王庙组储层研究尚未有公开发表文献系统论述, 其龙王庙组储层发育特征及发育规律成为首要解决的关键地质问题。

在前人研究基础上, 本文基于最新的钻井及分析测试等资料, 对蓬莱气区龙王庙组储层基本特征、储层主控因素等进行了分析, 并对比分析了蓬莱气区与安岳大气田主体区磨溪—高石梯地区龙王庙组储层特征的异同性, 以期对蓬莱气区乃至四川盆地龙王庙组油气勘探提供一定的参考。

1 区域地质背景

蓬莱气区地理位置上位于四川省中北部^[16-17](图1), 北至九龙山, 南至遂宁市船山区和安居区, 西至德阳市中江县, 东至阆中市仪陇县, 面积约 $2 \times 10^4\ \text{km}^2$ ^[8]; 构造单元上归属于川中古隆起北侧斜坡区, 断裂发育较少, 褶皱平缓, 呈西南高、东北低的单斜构造^[18]。

川中古隆起经历了加里东、海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期次构造运动叠置, 前人总体认为其起始于震旦纪末期^[19], 郁南运动基本定型, 广西运动最终定型^[20], 其中加里东造山运动对龙王庙组影响最大^[21]。

龙王庙组地层与上覆高台组和下伏沧浪铺组均整合接触, 磨溪—高石梯地区位于乐山—龙女寺加里东古隆起中部^[22], 其龙王庙组地层主要分为上下两段^[23-24]: 下段以含泥质的泥晶白云岩和少量颗粒白云岩为主, 混合沉积; 上段以厚层颗粒白云岩和晶粒白云岩为主^[25]。龙王庙组沉积期处于德阳—安岳裂陷槽沉积充填消亡期^[26], 前人针对上扬子区龙王庙组岩相古地理开展了研究工作, 提出了碳酸盐缓坡、碳酸盐台地等多种龙王庙组沉积模式^[27], 总体以碳酸盐台地沉积模式为主^[28], 可进一步划分出潮坪、台内滩、潟湖等亚相沉积^[23,28]。岩相古地理格局具有明显的北东—南西向带状展

布，蓬莱气区主要位于近岸线的局限台地区。垂向上，龙王庙组沉积期经历了2个四级、4个五级海平面升降旋回^[23]，发育3~4期颗粒滩^[29-30]。

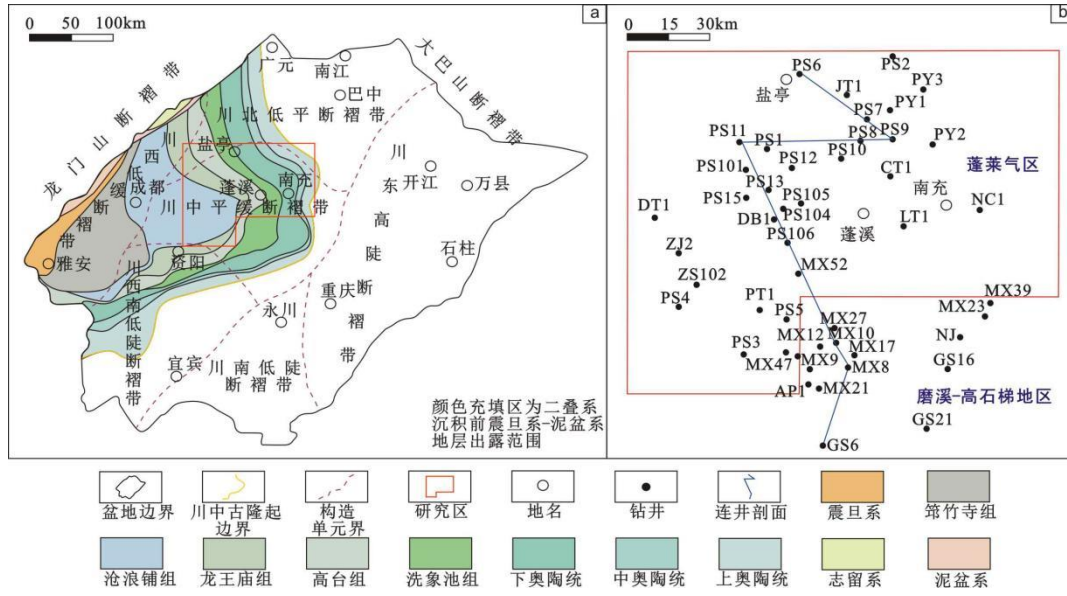


图1 四川盆地现今构造区划、川中古隆起二叠系沉积前古地质图 (a) 及主要钻井位置 (b)

图1a 据参考文献[19]修改。

Fig.1 Present tectonic division of Sichuan Basin, pre-Permian paleo-geological map of central Sichuan paleo-uplift (a), and location of main drilling wells (b)

2 蓬莱气区龙王庙组储层基本特征

2.1 蓬莱气区龙王庙组岩石类型

综合岩心观察及岩心薄片和岩屑薄片的观察分析，认为蓬莱气区龙王庙组以白云岩为主(图2)，包括(残余)颗粒白云岩(图3a-c)、结晶白云岩(图3d-f)、灰质白云岩(图3g)，同时，可见陆源碎屑—碳酸盐混积岩(文中简称混积岩)(图3h)等。

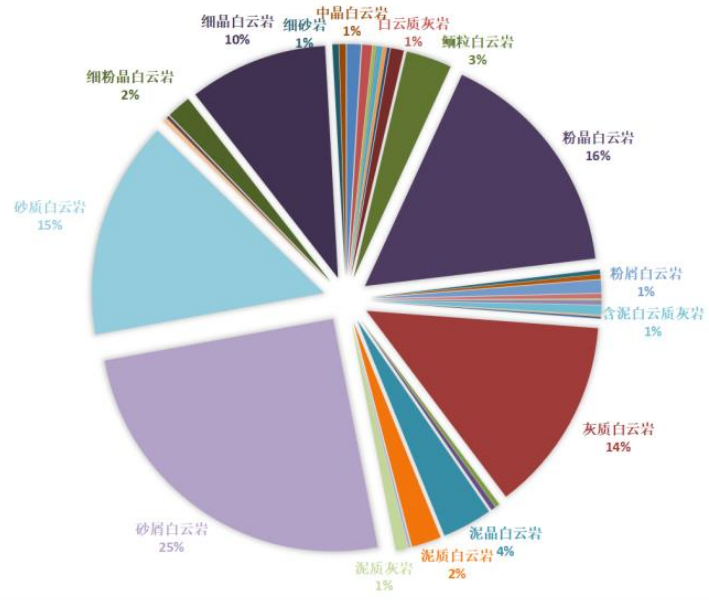
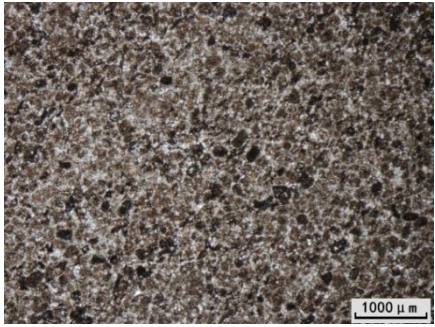


图2 川中地区蓬莱气区下寒武统龙王庙组岩石类型占比圆饼图

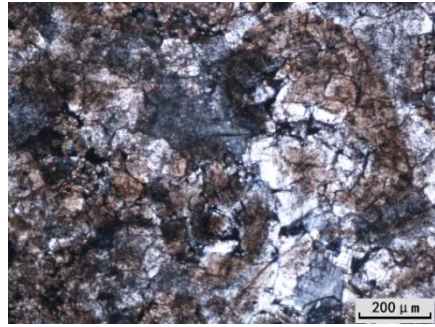
基于12口井岩性厚度数据统计。

Fig.2 Round pie chart of rock type proportion of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Penglai gas area, central Sichuan Basin

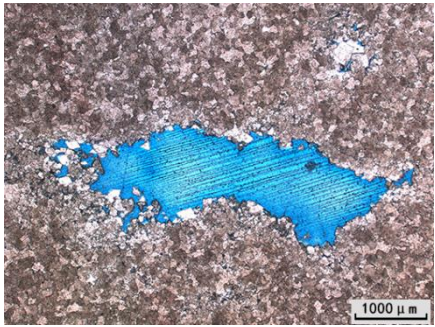
(残余)颗粒白云岩颗粒结构(图3a)总体清晰,部分呈残余结构(图3b, c),颗粒类型主要包括砂屑(图3a, c)、鲕粒(图3b)等,根据主要颗粒类型可以细分为残余鲕粒白云岩(图3b)、残余砂屑白云岩(图3c)、砂屑白云岩(图3a)、粉屑白云岩等,其中以砂屑白云岩为主,占比可达25%(图2),鲕粒白云岩仅占比3%(图2)。结晶白云岩主要可以分为细晶白云岩、粉-细晶白云岩(图3d)、粉晶白云岩(图3e)、泥微晶白云岩等,其中以粉晶白云岩和细晶白云岩为主(图2)。除以纯白云岩外,研究区还发育灰质白云岩和混积岩,混积岩中砂质白云岩占比达到15%(图2)。



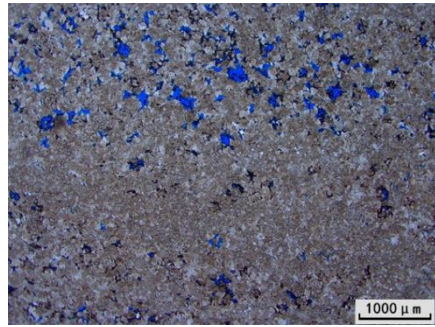
a. 砂屑白云岩, 6 331.82 m, PS9 井, 普通薄片, (-)



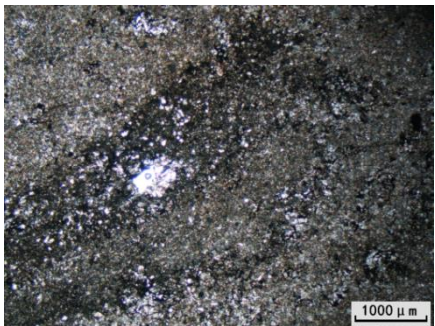
b. 残余鲕粒白灰质云岩, 可见少量粒内溶孔, 6 332.97 m, PS9 井, 普通薄片, (+)



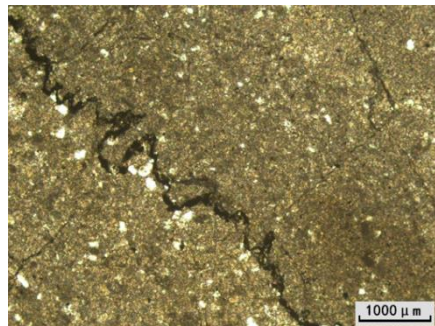
c. 残余砂屑白云岩, 溶蚀孔洞, 6 283.12 m, PS10 井, 岩心蓝色铸体薄片, (-)



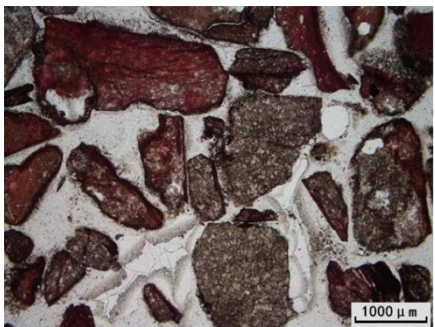
d. 粉-细晶白云岩, 晶间溶孔, 孔壁可见残余沥青, 可见残余砂屑结构, 6 317.37 m, PS9 井, 岩心蓝色铸体薄片, (-)



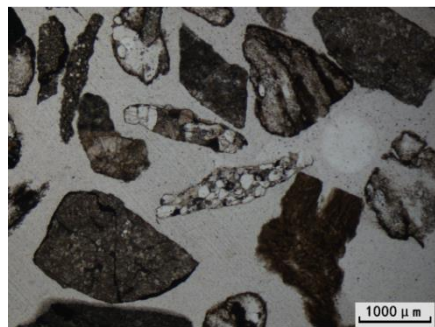
e. 粉晶白云岩, 见晶间溶孔, 6 323.65 m, PS9 井, 岩心普通薄片, (-)



f. 含陆源碎屑泥晶白云岩, 可见缝合线和微裂缝, 沥青充填, 6 574 m, PS7 井, 岩心普通薄片, (-)



g. 灰质白云岩, 6 348 m, PS9 井, 岩屑普通薄片,



h. 砂质白云岩, 可见微裂缝, 6 792 m, PS11 井,

茜素红染色, (-)

岩屑普通薄片, (-)

图3 川中地区蓬莱气区下寒武统龙王庙组典型岩性照片

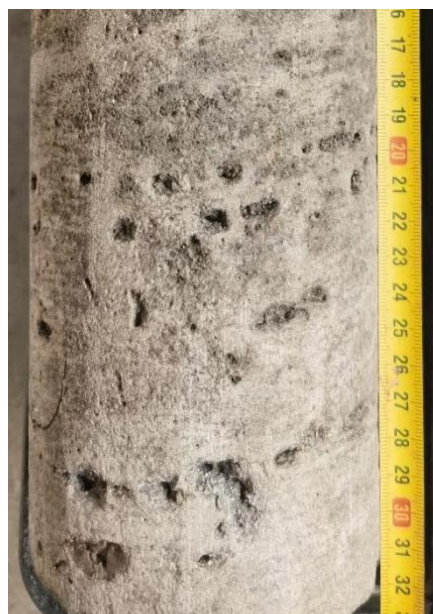
Fig.3 Typical lithological characteristics of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Penglai gas area, central Sichuan Basin

2.2 蓬莱气区储集空间类型

综合岩心观察、铸体薄片分析等, 揭示蓬莱气区龙王庙组储层以溶蚀孔、洞以及微裂缝等次生孔隙为主。

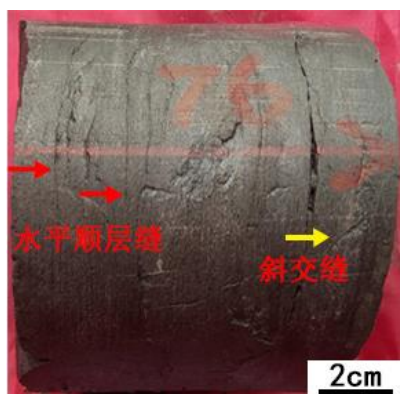
溶蚀孔隙包括粒间溶孔(图3c)、粒内溶孔(图3b)以及晶间溶孔(图3d)等。粒间溶孔与粒内溶孔主要发育在(残余)颗粒白云岩内, 晶间溶孔发育程度与白云石晶粒大小具有一定的正相关性, 总体上, 以细晶或者粉-细晶白云岩晶间溶孔发育(图3d), 而粉晶、泥晶白云岩晶间溶孔发育有限(图3e, f)。溶洞在残余颗粒白云岩中发育(图4a, b), 总体顺层分布, 且孔洞大小总体均匀(图4a, b), 可见溶洞与微裂缝共存(图4a), 溶蚀孔洞内往往充填或者部分充填自形白云石(图4a, b)。

蓬莱气区龙王庙组发育微裂缝, 总体上可以识别出构造缝(图4c, d)和溶蚀缝(图4a)。其中构造缝包括顺层缝(图4c)、斜交缝以及高角缝和直立缝(图4d)等, 多发育在结晶白云岩中; 微裂缝长短不等, 大多集中在数厘米到十几厘米, 缝内大部分未见明显充填, 少量可见泥质充填(图4d)。



a. 顺层溶蚀孔洞, 残余颗粒白云岩, 洞壁部分充填自形白云石, 具有准同生暴露的继承性, 6 732.51~6 732.69 m, PS11 井

b. 溶蚀孔洞和高角度微裂缝, 洞壁部分充填白云石, 残余颗粒白云岩, 6 269.03~6 269.20 m, PS10 井



c. 顺层缝和斜交缝, 粉晶白云岩,
6 330.48~6 330.58 m, PS9 井

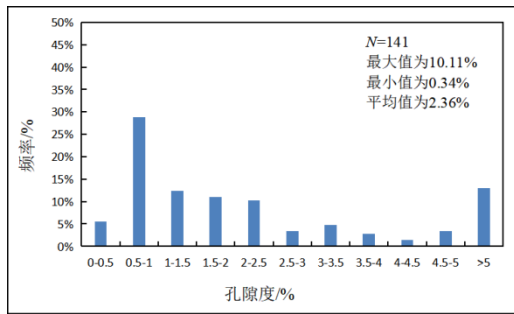
d. 高角一直立缝, 泥微晶白云岩, 6 307.64~6 307.89 m, PS9 井

图 4 川中地区蓬莱气区下寒武统龙王庙组储层典型储集空间类型照片

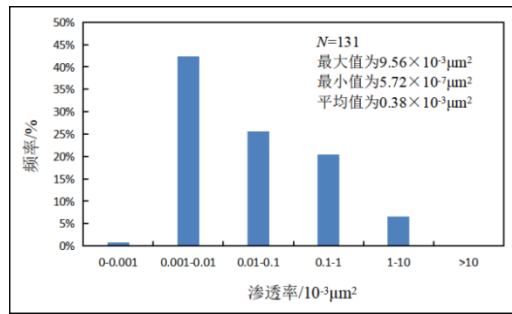
Fig.4 Typical reservoir space type of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Penglai gas area, central Sichuan Basin

2.3 蓬莱气区龙王庙组储层物性

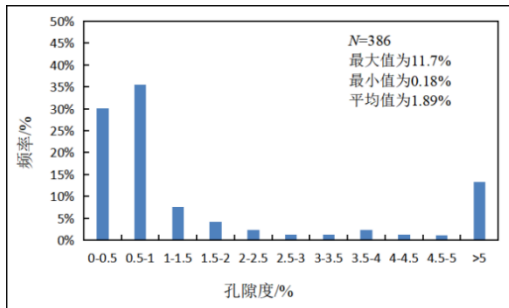
根据研究区小柱塞样品实测物性数据统计 (图 5a-b, 图 6a): 孔隙度为 0.34%~10.11%, 平均值为 2.36%, 主要介于 0.5%~2.5%; 渗透率为 $(0.000\ 572 \sim 9.56) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其渗透率主要介于 $(0.001 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属低孔低渗型储层。图 6 显示蓬莱气区龙王庙组储层渗透率与孔隙度总体呈现正相关特征, 但部分低孔隙度区域渗透率高, 可大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 指示了微裂缝的影响。



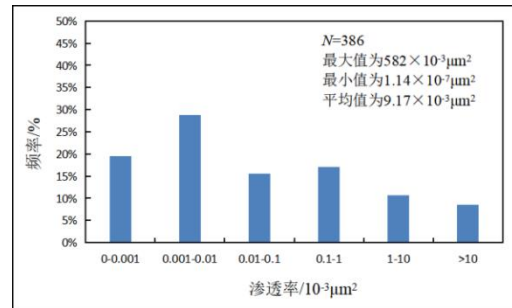
a. 蓬莱气区龙王庙组孔隙度频率分布直方图



b. 蓬莱气区龙王庙组渗透率频率分布直方图



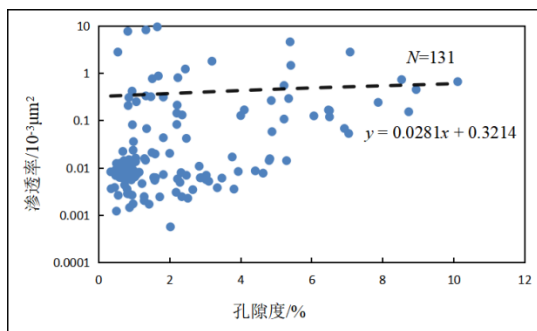
c. 磨溪—高石梯龙王庙组孔隙度频率分布直方图



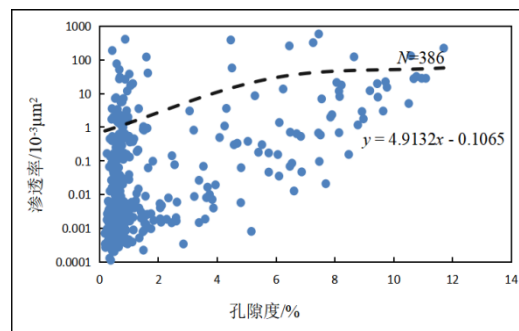
d. 磨溪—高石梯地区龙王庙组渗透率频率分布直方图

图 5 川中地区蓬莱气区和磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组储层孔渗频率分布直方图

Fig.5 Porosity and permeability frequency distribution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoir in Penglai gas area and Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin



a. 蓬莱气区



b. 磨溪—高石梯地区

图 6 川中地区蓬莱气区和磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组储层孔渗交会图

Fig.6 Porosity-permeability cross plots of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoir in Penglai gas area and Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin

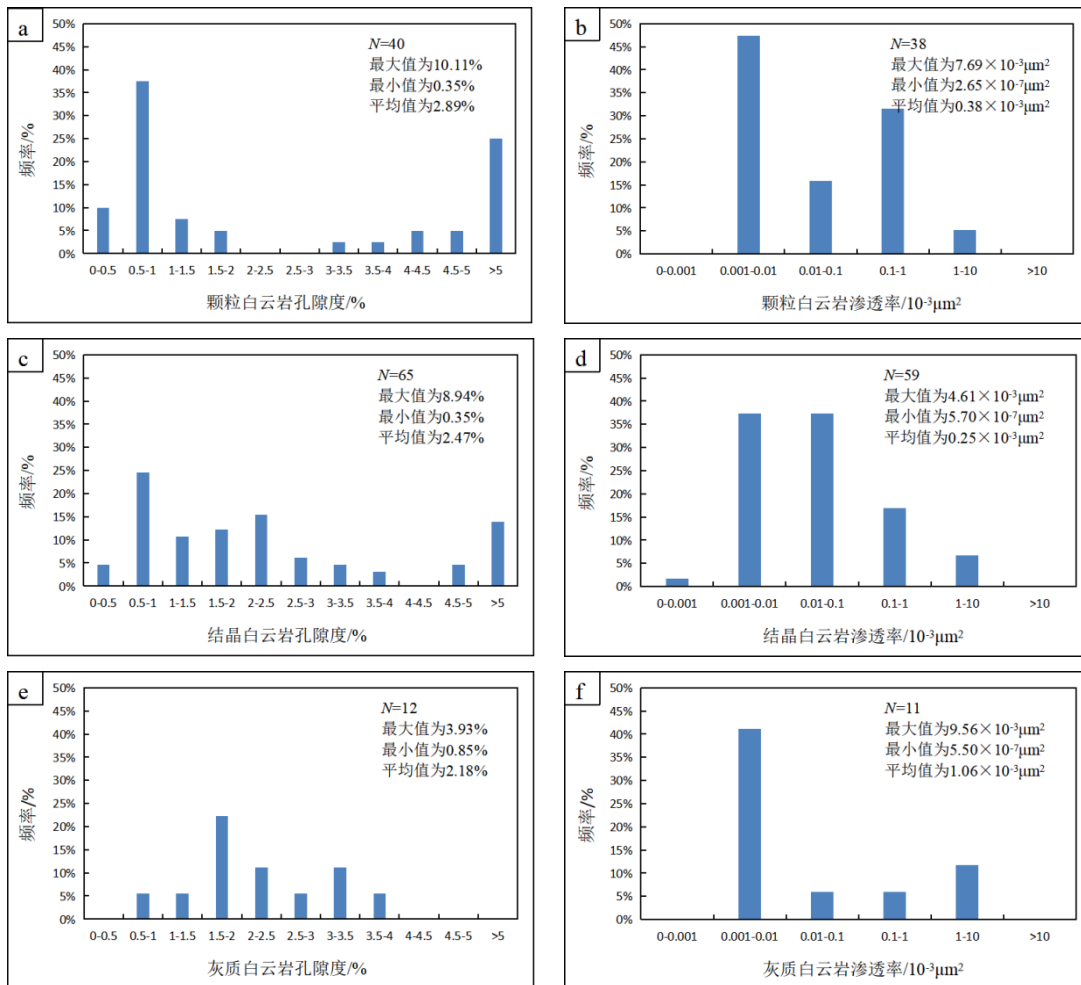
2.4 蓬莱气区龙王庙组储层厚度

对蓬莱气区 20 口钻井龙王庙组储层厚度进行统计，储层厚度在 1~55 m，主要介于 10~42 m（占比 75%）；基于 3 口钻井实测孔隙度数据，孔隙度大于 2% 的储层厚度为 6~18 m。

3 蓬莱气区龙王庙组储层发育主控因素

3.1 岩性控制

通过对研究区 3 口井 141 件实测物性数据统计，按照颗粒白云岩、结晶白云岩、灰质白云岩以及陆源混积岩等进行归类，揭示颗粒白云岩孔隙度介于 0.35%~10.11% 之间，平均值 2.89%，渗透率介于 $(0.002\ 65\sim7.69)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间，平均值 $0.38\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ；结晶白云岩孔隙度介于 0.35%~8.94% 之间，平均值 2.47%，渗透率介于 $(0.000\ 57\sim4.61)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间，平均值 $0.25\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ；灰质白云岩孔隙度介于 0.85%~3.93% 之间，平均值 2.18%，渗透率介于 $(0.005\ 5\sim9.56)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间，平均值 $1.06\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ；混积岩孔隙度介于 0.34%~3.03% 之间，平均值 1.3%，其渗透率介于 $(0.001\ 7\sim8.25)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间，平均值 $0.42\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ （图 7），总体揭示颗粒白云岩和结晶白云岩具有良好的储层物性，而混积岩也具有一定的储层潜力。



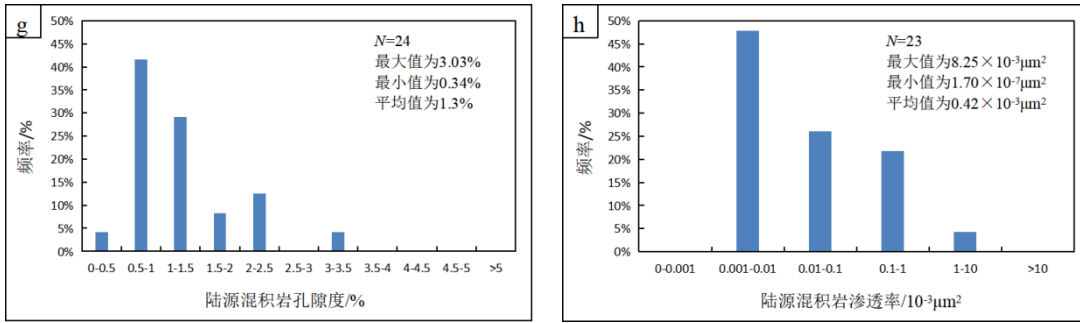
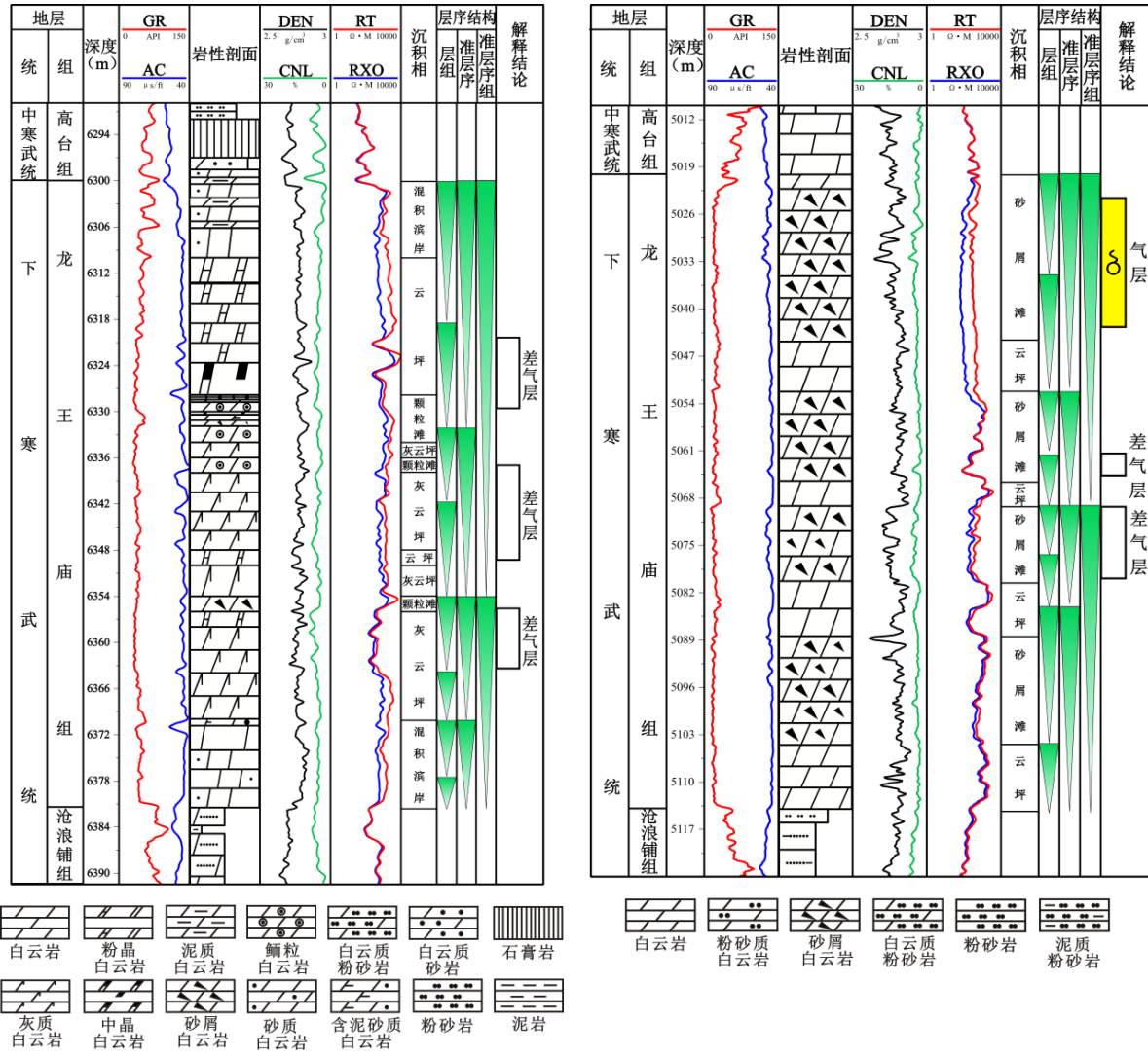


图7 川中地区蓬莱气区下寒武统龙王庙组不同岩性物性频率分布直方图

Fig.7 Frequency distribution of different lithological physical properties of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Penglai gas area, central Sichuan Basin

基于钻井资料，开展了层序地层划分，蓬莱气区和磨溪—高石梯地区层序地层划分具有明显可对比性，总体上，可划分出一个三级层序、两个准层序组（相当于四级层序）、四个准层序（相当于五级层序），与前人划分总体相近^[23]，层序地层明显控制了岩性旋回结构。在准层序组和准层序内部，总体上具有向上白云石化增强和颗粒云岩发育程度增强的趋势（图8和图9）。上文已经分析岩性对储层具有明显控制作用，因此，层序地层控制岩性的基础上，也控制了储层的垂向分布。



a. 蓬莱气区 PS9 井

b. 磨溪—高石梯地区 GS16 井

图8 川中地区蓬莱气区和磨溪—高石梯地区典型井下寒武统龙王庙组沉积特征及储层综合柱状图

Fig.8 Sedimentary characteristics and reservoir comprehensive histogram of typical wells in Penglai gas area and Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin

3.2 沉积相控制

蓬莱气区龙王庙组主要为局限台地沉积，与谢武仁^[28]、徐妍等^[23]的类似，因此，文中不再赘述沉积相标注及亚相、微相类型。蓬莱气区龙王庙组储层发育情况属相控型储层（表 1），沉积微相明显控制储层质量。在单井进行沉积微相划分后，通过对研究区 109 块岩石样品的物性统计发现，储层储集性能最好的为砂屑滩微相，其孔隙度平均值为 3.36%，渗透率平均值为 $0.373 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；鲕粒滩和云坪次之，孔隙度平均值分别为 1.67% 和 2.33%，渗透率平均值分别为 $0.198 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.288 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；灰云坪和泥云坪样品数较少，且孔隙度与渗透率都比较低，不利于储层发育。

表 1 川中地区蓬莱气区下寒武统龙王庙组主要沉积微相物性统计

Table 1 Statistics of physical properties of main sedimentary microfacies of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Penglai gas area, central Sichuan Basin

| 沉积微相 | 孔隙度/% | | | 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | | | 样品总数 |
|------|-------|------|-------|------------------------------|---------|---------|------|
| | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | |
| 鲕粒滩 | 7.08 | 0.48 | 1.670 | 2.810 | 0.003 6 | 0.198 0 | 18 |
| 灰云坪 | 1.14 | 0.85 | 0.995 | 0.109 | 0.008 2 | 0.009 5 | 2 |
| 泥云坪 | 5.41 | 0.90 | 1.850 | 1.470 | 0.013 3 | 0.224 0 | 7 |
| 砂屑滩 | 10.11 | 0.35 | 3.360 | 7.690 | 0.002 3 | 0.373 0 | 34 |
| 云坪 | 8.94 | 0.35 | 2.330 | 4.610 | 0.000 6 | 0.288 0 | 48 |

3.3 成岩作用控制

蓬莱气区储层建设性成岩作用主要包括溶蚀作用和破裂作用，胶结作用是主要破坏性成岩作用。总体上，溶蚀作用包括油气溶蚀（图 3d）、表生岩溶大气淡水溶蚀作用（图 4a, b），除此之外，准同生期短暂暴露对储层的形成具有很好的奠基作用。图 4a 显示了在继承准同生期暴露溶蚀基础上，叠合表生压溶形成了具有顺层分布的大一些的孤立溶孔。破裂作用对储层的渗透率具有很好的改善作用，目前发现的微裂缝具有多期次性，早期微裂缝往往被溶蚀扩容形成溶蚀缝（图 4a），而晚期的微裂缝未见明显充填物（图 4c, d）。

3.4 储层发育模式

综合以上分析，建立了储层发育模式，认为存在 2 种储层发育样式。总体上，白云石化颗粒滩是储层发育的核心要素，而表生岩溶改造程度不同部位有所差异，靠近隆起区剥蚀强，形成了表生岩溶叠合区，有利于储层形成；而远离剥蚀区，则主要以颗粒白云岩基质孔隙为主（图 10）。

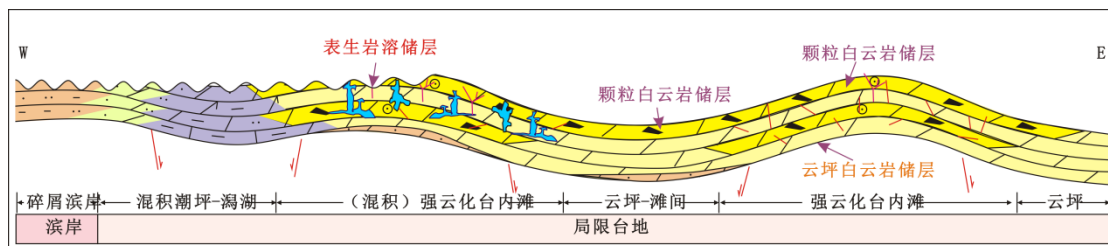


图 10 川中地区蓬莱气区下寒武统龙王庙组储层发育模式

Fig.10 Reservoir development model of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Penglai gas area, central Sichuan Basin

4 蓬莱气区和磨溪—高石梯地区储层差异性

将本次蓬莱气区储层发育特征与前人针对磨溪—高石梯地区龙王庙组储层发育特征进行对比（表 2），从岩性、物性、储集空间类型、成岩作用、沉积相以及主控因素等方面对二者进行综合对比，揭示蓬莱气区储层特征与磨溪—高石梯地区具有一定的异同性；岩性垂向结构相似，总体上龙王庙组岩性组合为上部和下部含陆源碎屑、中部为纯白云岩（图 8）。岩石类型和沉积环境上，蓬莱气区灰质白云岩相对发育，颗粒类型以砂屑为主，陆源碎屑输入总体偏强，准同生期暴露弱，而磨

溪一高石梯地区鲕粒更为发育，总体上反映蓬莱气区沉积环境水动力条件相对强，且准同生期暴露明显^[15,27]。孔隙空间类型对比，2个地区总体均以次生孔隙为主，且主要为溶蚀孔洞和微裂缝，蓬莱气区以溶蚀孔隙为主，而磨溪一高石梯地区缝—孔—洞更为发育（图11）。物性上，磨溪一高石梯地区龙王庙组，小柱塞样孔隙度介于2.00%~18.48%之间，平均4.27%，全直径样品孔隙度介于2%~11%之间，总平均孔隙度为4.95%；小柱塞样基质渗透率为 $(0.001\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，大于 $0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的样品占34.5%，平均为 $1.59\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，全直径样品分析渗透率为 $(0.01\sim 78.5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，总平均渗透率为 $4.71\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ^[27]，渗透率总体优于蓬莱气区（图5c-d，图6b），总体上，以低孔低渗储层为主，但磨溪一高石梯地区储层物性好于蓬莱气区，可发育低孔高渗储层^[15]。储层发育厚度方面，按照孔隙度大于2%储层厚度对比，总体上磨溪一高石梯地区优质储层发育的厚度大于蓬莱气区。储层主控因素对比，蓬莱气区与磨溪一高石梯地区龙王庙组储层都受沉积相和岩性控制，后期构造造成的表生岩溶和破裂及油气溶蚀等是核心建设性成岩作用（图4，图11）；但整体上，磨溪一高石梯地区表生岩溶改造程度要好于蓬莱气区（图11），蓬莱气区表生岩溶改造主要集中的西部。

表2 川中地区蓬莱气区和磨溪一高石梯地区下寒武统龙王庙组储层特征对比

Table 2 Comparison of reservoir characteristics of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Penglai gas area and Moxi-

Gaoshiti area, Sichuan Basin

| 地区 | 岩性 | 物性 | 储集空间类型 | 成岩作用 | 沉积相 | 主控因素 | 孔隙度大于2% 储层厚度/m |
|----------|--|---|---|---|-----------------------------|-----------------------|-------------------|
| 磨溪一高石梯地区 | 颗粒云岩、晶粒云岩为主；颗粒云岩主要包括砂屑云岩与鲕粒云岩，晶粒云岩主要包括粉—细晶云岩及花斑状粉晶云岩 | 小柱塞样孔隙度介于2.00%~18.48%之间，平均4.27%，全直径样品孔隙度介于2%~11%之间，总平均孔隙度为4.95%；小柱塞样基质渗透率介于 $(0.001\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间，大于 $0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的占34.5%，平均为 $1.59\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，全直径样品分析渗透率介于 $(0.01\sim 78.5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间，总平均渗透率为 $4.71\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；总体为低孔低渗、局部低孔高渗 | 以次生孔、洞、缝为主，偶见残余原生孔隙。包括粒间溶孔、晶间（溶）孔，少量粒内溶孔、铸模孔、残余粒间孔及膏模孔；裂缝包括构造缝、溶蚀缝、压溶缝 | 破裂作用、压实压溶作用、胶结作用、白云化作用（准同生期海水白云化、早成岩期大气淡水白云化、中—晚成岩期埋藏白云化）、溶蚀作用（准同生期溶蚀作用、表生期顺层溶蚀作用、埋藏溶蚀作用） | 泥云坪、砂云坪、颗粒滩、滩间海，总体属局限台地沉积 | 古地理环境、沉积相、海平面变化、古构造控制 | 20~60 |
| | | 砂屑云岩、砂质云岩、晶粒云岩、灰质云岩为主；其中晶粒云岩中粉晶白云岩占比最大，细晶白云岩次之，中晶白云岩占比最小 | 孔隙度介于0.34%~10.11%之间，平均为2.36%，主要介于0.5%~2.5%之间；渗透率介于 $(5.72\times 10^{-4}\sim 9.56)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间，平均为 $0.38\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，主要介于 $(0.001\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间；总体低孔低渗 | 以次生孔、洞、缝为主，包括晶间溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔等；裂缝包括构造缝、溶蚀缝 | 溶蚀作用、破裂作用、压实压溶作用、胶结作用、白云化作用 | 混积滨岸、灰云坪、颗粒滩、云坪 | 岩性、层序地层、沉积相、成岩作用 |

注：磨溪一高石梯地区龙王庙组储层特征统计来自参考文献[15, 28, 31-33]。

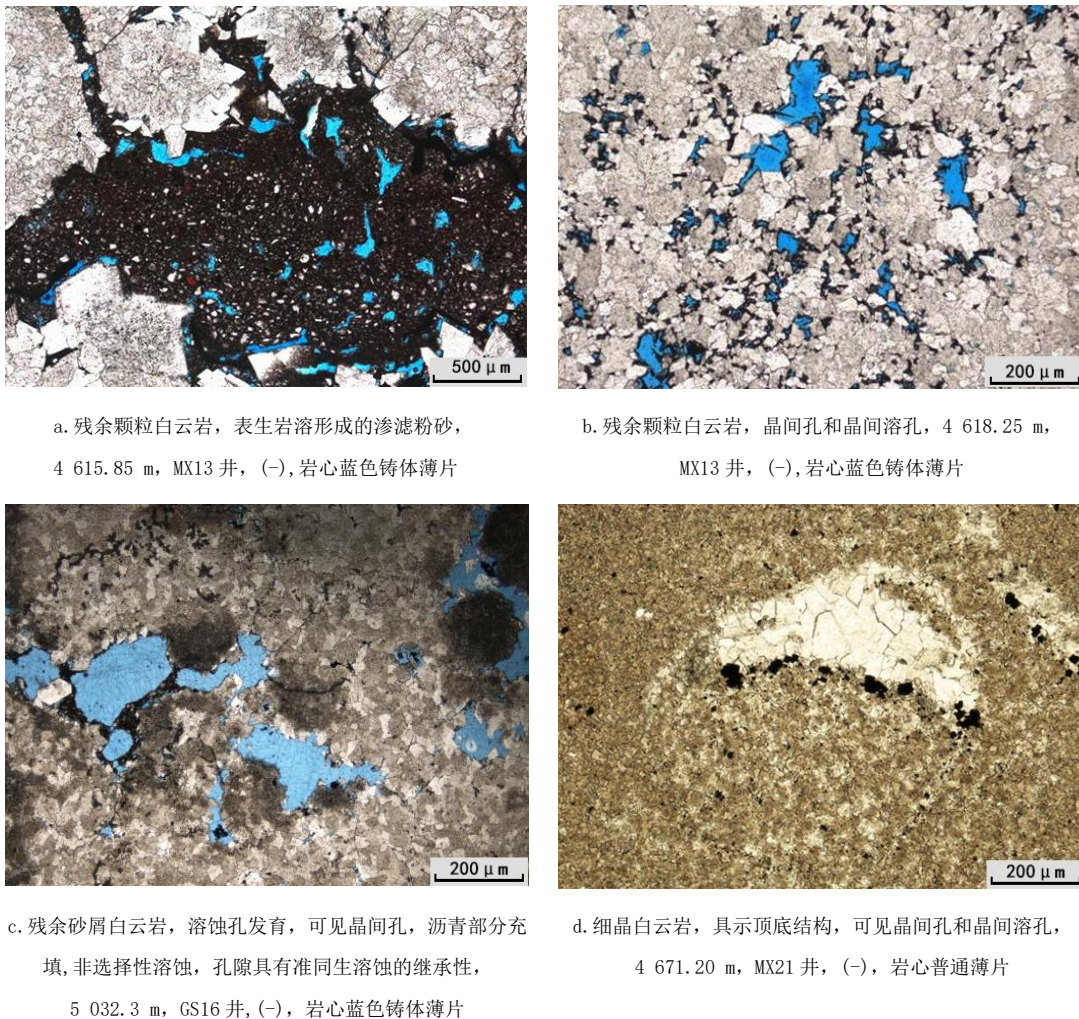


图 11 川中地区蓬莱气区与磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组储集空间类型对比

Fig.11 Comparison of reservoir space types of Lower Cambrian Longwangmiao Formation between Penglai gas area and Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin

综合以上分析，认为进积型准层序组中上部具有准同生期暴露的颗粒滩和粉晶—细晶白云岩，以及表生岩溶改造的白云岩区是蓬莱气区重要的优质储层发育部位；混合沉积区可存在储层，也是关注的部位之一；灰质和泥质含量高的层段储层发育程度弱。

5 结论

(1) 蓬莱气区龙王庙组储层发育，较磨溪—高石梯地区具有陆源碎屑和灰质含量高、准同生期暴露略弱等特点，发育低孔、低渗储层，以（残余）颗粒白云岩和结晶白云岩为主，储集空间类型主要为溶蚀孔洞及微裂缝等次生孔隙。

(2) 蓬莱气区龙王庙组储层明显受控于层序地层、岩性和成岩作用等，储层主要发育在进积型准层序组和准层序组中上部，优质储集岩主要为灰质和陆源碎屑含量低的（残余）颗粒白云岩和晶粒相对粗的粉晶—细晶白云岩，溶蚀和破裂作用是核心建设性成岩作用，准同生期暴露及表生期大气淡水溶蚀改造储层更优。

(3) 准同生期暴露的高能颗粒白云岩和结晶白云岩及表生岩溶改造的白云岩，是蓬莱气区龙王庙组重点关注的优质储层目标。

致谢：本文在研究过程中得到了古强、王兆鹏、冯山山、王歌圣、田洪源、郑杭、文娇、刘时雨、魏曦、弋金池等多位硕博生资料整理的帮助，感谢评审专家的指导，在此致以衷心感谢！

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

邢凤存、刘子琪参与实验设计；邢凤存、刘子琪完成实验操作；邢凤存、刘子琪、钱红杉、李勇、周刚、张亚、黄茂轩、李成龙、龙虹宇参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by XING Fengcun and LIU Ziqi. The experimental operation was completed by XING Fengcun and LIU Ziqi. The manuscript was drafted and revised by XING Fengcun, LIU Ziqi, QIAN Hongshan, LI Yong, ZHOU Gang, ZHANG Ya, HUANG Maoxuan, LI Chenglong and LONG Hongyu. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 杜金虎,邹才能,徐春春,等.川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J].石油勘探与开发,2014,41(3):268-277.
DU Jinhu,ZOU Caineng,XU Chunchun,et al.Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(3):268-277.
- [2] 张满郎,郭振华,张林,等.四川安岳气田龙王庙组颗粒滩岩溶储层发育特征及主控因素[J].地学前缘,2021,28(1):235-248.
ZHANG Manlang,CUO Zhenhua,ZHANG Lin,et al.Characteristics of and main factors controlling the karst shoal reservoir of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the Anyue gas field,central Sichuan Basin,China.Earth Science Frontiers,2021,28(1):235-248.
- [3] HAO Bin,ZHAO Wenzhi,HU Suyun,et al.Bitumen formation of Cambrian Longwangmiao Formation in the central Sichuan and its implication for hydrocarbon accumulation[J].Petroleum Research,2018,3(1):44-56.
- [4] ZENG Hongliu,ZHAO Wenzhi,XU Zhaohui,et al.Carbonate seismic sedimentology: a case study of Cambrian Longwangmiao Formation,Gaoshiti-Moxi area,Sichuan Basin,China[J].Petroleum Exploration and Development Online,2018,45(5):830-839.
- [5] 邹才能,杜金虎,徐春春,等.四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J].石油勘探与开发,2014,41(3):278-293.
ZOU Caineng,DU Jinhu,XU Chunchun,et al.Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field,Sichuan Basin,SW China[J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(3):278-293.
- [6] 代林呈,王志兴,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.
DAI Lincheng,WANG Xingzhi,DU Shuangyu,et al.Characteristics and genesis of Lower Cambrian Longwangmiao beach-facies reservoirs in central part of Sichuan Basin [J].Marine Origin Petroleum Geology,2016,21(1):19-28.
- [7] 杜金虎,张宝民,汪泽成,等.四川盆地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.
DU Jinhu,ZHANG Baomin,WANG Zecheng,et al.Sedimentary model and reservoir genesis of dual grain banks at the Lower Cambrian Longwangmiao Fm carbonate ramp in the Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry,2016,36(6):1-10.
- [8] 杨雨,文龙,宋泽章,等.川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J].石油学报,2022,43(10):1351-1368.
YANG Yu,WEN Long,SONG Zezhang,et al.Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi layer system of Penglai gas area in the northwest of central Sichuan paleo-uplift[J].Acta Petrolei Sinica,2022,43(10):1351-1368.
- [9] 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(自然科学版),2014,41(6):657-670.
LIU Shugen,SONG Jinmin,ZHAO Yihua,et al.Controlling factors of formation and distribution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation high-quality reservoirs in Sichuan Basin,China[J].Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition),2014,41(6):657-670.
- [10] 魏国齐,谢增业,杨雨,等.四川盆地中部北斜坡震旦系—寒武系大型岩性气藏形成条件[J].石油勘探与开发,2022,49(5):835-846.
WEI Guoqi,XIE Zengye,YANG Yu,et al. Formation conditions of Sinian-Cambrian large lithologic gas reservoirs in the north slope area of central Sichuan Basin, SW China[J].Petroleum Exploration and Development,2022,49(5):835-846.
- [11] JIN Mindong,ZENG Wei,TAN Xiucheng,et al.Characteristics and controlling factors of beach-controlled karst reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation,Moxi-Gaoshiti area,Sichuan Basin,NW China[J].Petroleum Exploration and Development Online,2014,41(6):712-723.
- [12] 王颀,胡明毅,高达,等.川中磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组层序格架内滩体的发育演化特征及对储层的控制[J].海相油气地质,2017,22(1):47-54.
WANG Di,HU Mingyi,GAO Da,et al.Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan[J].Marine Origin Petroleum Geology,2017,22(1):47-54.

- [13]任大伟,江维,高达,等.川中磨溪地区龙王庙组沉积相与高频层序对储层的控制[J].地质与资源,2018,27(1):77-82.
REN Dawei,JIANG Wei,GAO Da,et al.The control of sedimentary facies and high frequency sequence on reservoir of Longwangmiao Formation in Moxi area, central Sichuan[J].Geology and Resources,2018,27(1):77-82.
- [14]杨威,魏国齐,谢武仁,等.川中地区龙王庙组优质储层发育的主控因素及成因机制[J].石油学报,2020,41(4):421-432.
YANG Wei,WEI Guoqi,XIE Wuren,et al.The main controlling factors and genetic mechanism of the development of high-quality reservoirs in Longwangmiao Formation in central Sichuan[J].Acta Petrolei Sinica,2020,41(4):421-432.
- [15]李劲松,于豪,李文科,等.高石梯—磨溪地区寒武系储层主控因素的地震地层学解释[J].石油地球物理勘探,2019,54(1):208-216.
LI Jinsong,YU Hao,LI Wenke,et al.Seismic stratigraphy interpretation of main control factors of Cambrian reservoirs in Gaoshiti-Mloxi area[J].Oil Geophysical Prospecting,2019,54(1):208-216.
- [16]赖锦,王贵文.气藏渗流屏障测井识别方法及应用——以四川盆地中部蓬莱地区须二段为例[J].石油天然气学报,2013,35(1):94-98.
LAI Jin,WANG Guiwen.Gas reservoir seepage barrier logging identification method and its application:taking the second member of Xujiache Formation in Penglai area of central Sichuan Basin as an example[J].Journal of Oil and Gas Technology,2013,35(1):94-98.
- [17]王小娟,钟佳倚,李明秋,等.四川盆地蓬莱地区须家河组须二气藏气水关系初探[J].天然气勘探与开发,2015,38(2):1-5.
WANG Xiaojuan,ZHONG Jiayi,LI Mingqiu et al.Gas-water relation of Xujiache 2 gas reservoir in penglai area,Sichuan Basin[J].Natural Gas Exploration and Development,2015,38(2):1-5.
- [18]张本健,钟原,周刚,等.四川盆地中部蓬莱地区灯二段沉积微相演化及气藏综合评价[J].海相油气地质,2023,28(1):1-10.
ZHANG Benjian,ZHONG Yuan,ZHOU Gang,et al.Sedimentary microfacies evolution and comprehensive evaluation of gas reservoir of the Dengying Member 2 in Penglai area,central Sichuan Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2023,28(1):1-10.
- [19]严威,罗冰,周刚,等.川中古隆起寒武系沧浪铺组下段天然气地质特征及勘探方向[J].石油勘探与开发,2021,48(2):290-302.
YAN Wei,LUO Bing,ZHOU Gang,et al.Natural gas geology and exploration direction of the Cambrian Lower Canglangpu Member in central Sichuan paleo-uplift,Sichuan Basin,SW China[J].Petroleum Exploration and Development,2021,48(2):290-302.
- [20]汪泽成,赵文智,胡素云,等.克拉通盆地构造分异对大油气田形成的控制作用:以四川盆地震旦系—三叠系为例[J].天然气工业,2017,37(1):9-23.
WANG Zecheng,ZHAO Wenzhi,HU Suyun,et al.Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in cra-ton basins: a case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry,2017,37(1):9-23.
- [21]YANG Weiqiang,LI Pingping,CHEN Haoru,et al.Origin and significance of carbonate shoal depositional cycles:a case study of the Cambrian Longwangmiao Formation,Sichuan Basin,SW China[J].Journal of Asian Earth Sciences,2022,226. DOI:10.1016/j.jseae.2022.105083.
- [22]TAN Lei,LIU Hong,TANG Qingsong,et al.Application of seismic geomorphology to carbonate rocks: a case study of the Cambrian Longwangmiao Formation in the Gaoshiti-Moxi area,Sichuan Basin,China[J].Marine and Petroleum Geology,2021.
- [23]徐妍,杨雪飞,唐浩,等.川中地区龙王庙组花斑白云岩储层特征及成因机理[J].天然气地球科学,2023,34(3):402-417.
XU Yan,YANG Xuefei,TANG Hao,et al.Reservoir characteristics and genetic mechanism of mottled dolomite of Longwangmiao Formation in central Sichuan Basin[J].Natural Gas Geoscience,2023,34(3):402-417.
- [24]SHEN Anjiang,CHEN Yana,PAN Liyin,et al.Facies and porosity origin of reservoirs:case studies from the Cambrian Longwangmiao Formation of Sichuan Basin,China,and their implications on reservoir prediction[J].Journal of Natural Gas Geoscience,2018,3(1):37-49.
- [25]刘冷杉,胡明毅,高达,等.四川磨溪—高石梯地区龙王庙组层序划分及储层预测[J].大庆石油地质与开发,2016,35(5):42-47.
LIU Lingshan,HU Mingyi,GAO Da,et al.Sequence strata and reservoir prediction for Longwangmiao Formation in Sichuan Moxi-Gaoshiti area[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2016,35(5):42-47.
- [26]魏国齐,杨威,谢武仁,等.克拉通内裂隙及周缘大型岩性气藏形成机制、潜力与勘探实践:以四川盆地震旦系—寒武系为例[J].石油勘探与开发,2022,49(3):465-477.
WEI Guoqi,YANG Wei,XIE Wuren,et al.Formation mechanisms, potentials and exploration practices of large lithologic gas reservoirs in and around an intracratonic rift: taking the Sinian-Cambrian of Sichuan Basin as an example[J].Petroleum Exploration and Development,2022,49(3):465-477.
- [27]陈娅娜,张建勇,李文正,等.四川盆地寒武系龙王庙组岩相古地理特征及储层成因与分布[J].海相油气地质,2020,25(2):171-180.
CHEN Yana,ZHANG Jianyong,LI Wenzheng,et al.Lithofacies paleogeography,reservoir origin and distribution of the Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2020,25(2):171-180.
- [28]谢武仁.川中地区龙王庙组储层类型划分、主控因素研究及分布预测[D].成都:成都理工大学,2019.

XIE Wuren.Study on reservoir type classification & main controlling factors of reservoirs in Longwangmiao Formation and reservoir distribution prediction in central Sichuan Basin[D].Chengdu:Chengdu University Of Technology,2019.

[29]姚根顺,周进高,邹伟宏,等.四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J].海相油气地质,2013,18(4):1-8.

YAO Genshun,ZHOU Jingao,ZOU Weihong,et al.Characteristics and distribution rule of Lower Cambrian Longwangmiao Grain Beach in Sichuan Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2013,18(4):1-8.

[30]谢武仁,杨威,李熙喆,等.四川盆地川中地区寒武系龙王庙组颗粒滩储层成因及其影响[J].天然气地球科学,2018,29(12):1715-1726.

XIE Wuren,YANG Wei,LI Xizhe,et al.The origin and influence of the grain beach reservoirs of Cambrian Longwangmiao Formation in central Sichuan area, Sichuan Basin[J].Natural Gas Geoscience,2018,29(12):1715-1726.

[31]王丹玲,薛纯琦,李生涛,等.四川盆地高磨区块龙王庙储层岩性特征及其孔隙特征分析[J].中国锰业,2017,35(3):47-49.

WANG Danling,XUE Chunqi,LI Shengtao,et al.An analysis of reservoir lithology and pore characteristics of Dragon King Temple in Sichuan[22][J].China Manganese Industry,2017,35(3):47-49.

[32]邢梦妍,胡明毅,高达,等.高磨地区龙王庙组滩相储层特征及主控因素[J].桂林理工大学学报,2017,37(1):37-46.

XING Mengyan,HU Mingyi,GAO Da,et al.Characteristics and main controlling factors of Lower Cambrian Longwangmiao Formation beach-facies reservoirs in Gaoshiti - Moxi area,central Sichuan Basin[J].Journal of Guilin University of Technology,2017,37(1):37-46.

[33]王雅萍,杨雪飞,王兴志,等.川中磨溪地区龙王庙组晶粒白云岩储集性能及成因机制[J].地质科技情报,2019,38(1):197-205.

WANG Yaping,YANG Xuefei,WANG Xingzhi,et al.Reservoir property and genesis of powder crystal dolomite in the Longwangmiao Formation,Moxi area in central Sichuan Basin[J].Bulletin of Geological Science and Technology, 2019,38(1):197-205.