第 27 卷 第 5 期
2025 年 10 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27 No. 5
Oct. 2025

文章编号：1671-1505(2025)05-1119-18 **DOI**:10.7605/gdlxb.2025.067

四川盆地高石梯地区龙王庙组准层序微相组合及其孔隙成因差异性分析*

屈海洲[1] 田 伟[1] 杨东凡[2] 周 刚[2]
陈 洋[2] 张兴宇[1] 何溥为[2] 张云峰[1]

1 西南石油大学地球科学与技术学院，四川成都 610500
2 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院，四川成都 610000

摘 要 四川盆地高石梯地区寒武系第二统龙王庙组天然气资源十分丰富，但不同滩体的孔隙差异性研究仍有不足。基于岩心观察和薄片鉴定，认为龙王庙组准层序中发育由不同类型滩体组成的 4 种微相组合，分别为砂屑滩—鲕粒滩型、滩间海—砂屑滩型、砂屑滩—云坪型、中-高能砂屑滩型。这 4 种微相组合在不同成岩阶段的成岩作用存在明显差异，且主要体现在各微相组合的上部岩石中：砂屑滩—鲕粒滩型上部主要发育受大气淡水溶蚀影响的粒间溶孔，面孔率介于 2%~6%之间；滩间海—砂屑滩的粒间溶孔经历了大气淡水溶蚀和中-深埋藏期溶蚀和大量胶结物的充填，面孔率介于 1.5%~5%之间；砂屑滩—云坪型受到大气淡水溶蚀、中-深埋藏期溶蚀控制，发育孔径分异明显的粒间孔、粒内溶孔和晶间溶孔，面孔率介于 2%~8%之间；中-高能砂屑滩型埋藏期溶蚀强度与晚期胶结物发育关系密切，形成的粒间溶孔孔径差异较大，面孔率介于 1.4%~5.8%之间。因此，4 类微相组合的孔隙度由高到低依次为砂屑滩—云坪型、砂屑滩—鲕粒滩型、中-高能砂屑滩型、滩间海—砂屑滩型。上述研究成果提供了一个分析准层序下不同微相发育的次生孔隙类型及演化特征的实例，对于进一步评价不同类型储集层的差异性具有重要意义。

关键词 四川盆地 高石梯地区 龙王庙组 准层序 微相组合 成岩作用 孔隙成因

第一作者简介 屈海洲，男，1987 年生，博士，副教授，沉积学及储层地质学。E-mail：quhaizhou@swpu.edu.cn。

中图分类号：P618.130.2+1 **文献标志码**：A

Microfacies assemblages within parasequence stratigraphy and their differences in pore genesis of the Cambrian Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

QU Haizhou[1] TIAN Wei[1] YANG Dongfan[2] ZHOU Gang[2]
CHEN Yang[2] ZHANG Xingyu[1] HE Puwei[2] ZHANG Yunfeng[1]

1 *School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu* 610500, *China*
2 *Exploration Department, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu* 610000, *China*

*国家自然科学基金项目（编号：41702163，42272181，42472174），中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目（编号：2020CX010301）联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China（Nos. 41702163, 42272181, 42472174）, and Science and Technology Cooperation Project of the CNPC-SWPU Inno-vation Alliance（No. 2020CX010301）]

收稿日期：2024-09-26 改回日期：2025-02-06

Abstract The Cambrian Longwangmiao Formation in the Gaoshti area of the Sichuan Basin is abundant in natural gas resources. However, studies on pore diversity among different beach bodies are still insufficient. Based on core observations and thin-section analysis, four distinct microfacies assemblages within the parasequences of the Longwangmiao Formation have been identified. These assemblages exhibit significant differences in diagenetic processes at various stages, particularly in the upper sections of each microfacies: (1) The sandstone shoal-oolitic shoal primarily develops intergranular dissolution pores due to meteoric freshwater dissolution, with porosity ranging from 2% to 6%. (2) The intershoal sea-sandstone shoal experiences both meteoric freshwater dissolution and dissolution during medium-deep burial stages, as well as extensive cementation, resulting in intergranular dissolution pores with porosity ranging from 1.5% to 5%. (3) The sandstone shoal-dolomite flat is influenced by meteoric freshwater dissolution, dissolution during medium-deep burial stages, and recrystallization, leading to the development of intergranular pores, intragranular dissolution pores, and intercrystalline dissolution pores with distinct pore size differentiation, exhibiting porosity ranging from 2% to 8%. (4) The medium-high energy sandstone shoal shows a strong correlation between burial dissolution intensity and late-stage cementation, resulting in intergranular dissolution pores with significant pore size variation, with porosity ranging from 1.4% to 5.8%. Therefore, the porosity of the four types of microfacies assemblages, ranked from highest to lowest, is as follows: sandstone shoal-dolomite flat (2%~8%), sandstone shoal-oolitic shoal (2%~6%), medium-high energy sandstone shoal (1.4%~5.8%), and intershoal sea-sandstone shoal (1.5%~5%). This study provides valuable insights into the types and evolutionary characteristics of secondary pores in rocks within the parasequences, which is crucial for evaluating the differences in various reservoir types.

Key words Sichuan Basin, Gaoshiti area, Longwangmiao Formation, parasequence, microfacies assemblage, diagenesis, pore genesis

About the first author QU Haizhou, born in 1987, Ph. D., associate professor, is engaged in researches on sedimentology and reservoir geology. E-mail: quhaizhou@swpu.edu.cn.

四川盆地中部下寒武统龙王庙组发现了迄今为止中国最大的单体海相整装气田，该气田为典型的颗粒滩相岩溶型气藏（彭程飞，2021；王东等，2022；赵玉茹，2023）。川中龙王庙组沉积厚度普遍在百米以内，沉积时限通常小于 5 Ma（李伟等，2012；杜金虎等，2016；梁金同等，2023），也有学者认为约 6 Ma（高达等，2021）。前人根据沉积时限、古环境、盆地尺度等因素划分出的三级层序和四级层序（王峴等，2017；梁金同等，2023；Zhao *et al.*，2024）并不相同，且在五级层序方面研究较少（高达等，2021；邢凤存等，2024）。川中龙王庙组储集层普遍集中在颗粒滩中，颗粒滩滩体展布在纵向上呈现多套叠置、单套厚度较小、发育多个颗粒滩—潮坪组合序列（韩波等，2018），横向上具连续性较差的特点（杜金虎等，2016；彭程飞，2021）。龙王庙组后期成岩作用强烈（Jiang *et al.*，2023b），次生孔隙十分发育，但前人对于次生孔隙的研究主要集中于单一的岩性上（张建勇等，2015；车国琼等，2021），认为早期白云石化有利于减弱压实、压溶作用导致的降孔，溶蚀作用、构造作用是主要建设性成岩作用，胶结作用为主要破坏性成岩作用（邢凤存等，2024）。因此，分析并明确五级层序中岩石发育的次生孔隙类型及演化特征的差异性，是进一步评价不同类型储集层差异性的关键。

文中基于对川中高石梯地区大量岩心及薄片资料的精细分析，划分出具有不同微相组合的五级层序，并研究微相组合内部以及相互之间的成岩作用、孔隙特征的差异性。为了方便后文叙述，笔者使用 Van Wagoner 等（1991）提出的与五级层序相当的概念“准层序”，即以海泛面为界、沉积时限一般为几万年至几十万年、由成因上有联系的层或层组构成的相对整合序列（Vail *et al.*，1991；Catuneanu，2009；朱筱敏，2023），旨在阐明成岩

作用、孔隙特征等因素之间的联系，探讨不同微相组合孔隙的成因，以明确高石梯地区龙王庙组不同类型优质储集层之间的差异性。

1　区域地质概况

高石梯地区位于四川省资阳市、重庆市潼南县境内，构造上属于四川盆地中部的川中古隆起中西部的高石梯—磨溪古隆起（李伟等，2012）。该地区寒武系第二统龙王庙组发育一套以白云岩为主的碳酸盐岩地层，岩性分为 2 类：一类为低能环境（潮坪、滩间海、低能砂屑滩）中的泥粉晶白云岩、细晶白云岩、藻黏结残余砂屑云岩、残余砂屑云岩；另一类为高能环境（高能鲕粒滩、高能砂屑滩）中的亮晶砂屑云岩、亮晶鲕粒云岩（金民东等，2014）（图 1）。

龙王庙组为连续沉积（金民东等，2016），整体包括 2 个三级层序（SQ1、SQ2），据此可将其划分为龙一段和龙二段。每个三级层序具有完整的海侵体系域和高位体系域，其中海侵体系域的 GR 曲线具有锯齿状高值的特征，高位体系域的 GR 曲线具有微齿状低值特征。四级层序是对三级层序更为精细的划分，不同体系域包含不同类型的准层序组（与四级层序相当）。海侵体系域包含退积型准层序组，主要为台内滩—滩间海、潮坪亚相组成的四级层序。SQ1 高位体系域由 1 个退积型和 2 个进积型准层序组组成，前者为沉积巨厚台内滩的退积型层序，后者分别为滩间海—台内滩和潮坪的进积型准层序组。SQ2 高位体系域分为 2 个进积型准层序组，主要发育台内滩或滩间海—台内滩的进积型准层序组（梁金同等，2023）（图 1）。

2　准层序微相组合类型

基于岩心观察和铸体薄片分析，将高石梯地区龙王庙组白云岩划分为亮晶鲕粒云岩、亮晶砂屑云岩、含砂屑泥晶云岩、残余砂屑云岩、泥晶云岩、粉晶云岩和细晶云岩 7 种类型。这 7 种白云岩在垂向上相互叠置，形成具有不同微相组合的准层序。考虑到龙王庙组的储集层有利微相为颗粒滩（姚根顺等，2013；周进高等，2015；杜金虎等，2016；谢武仁，2019；刘大卫，2021；Zhao *et al.*,

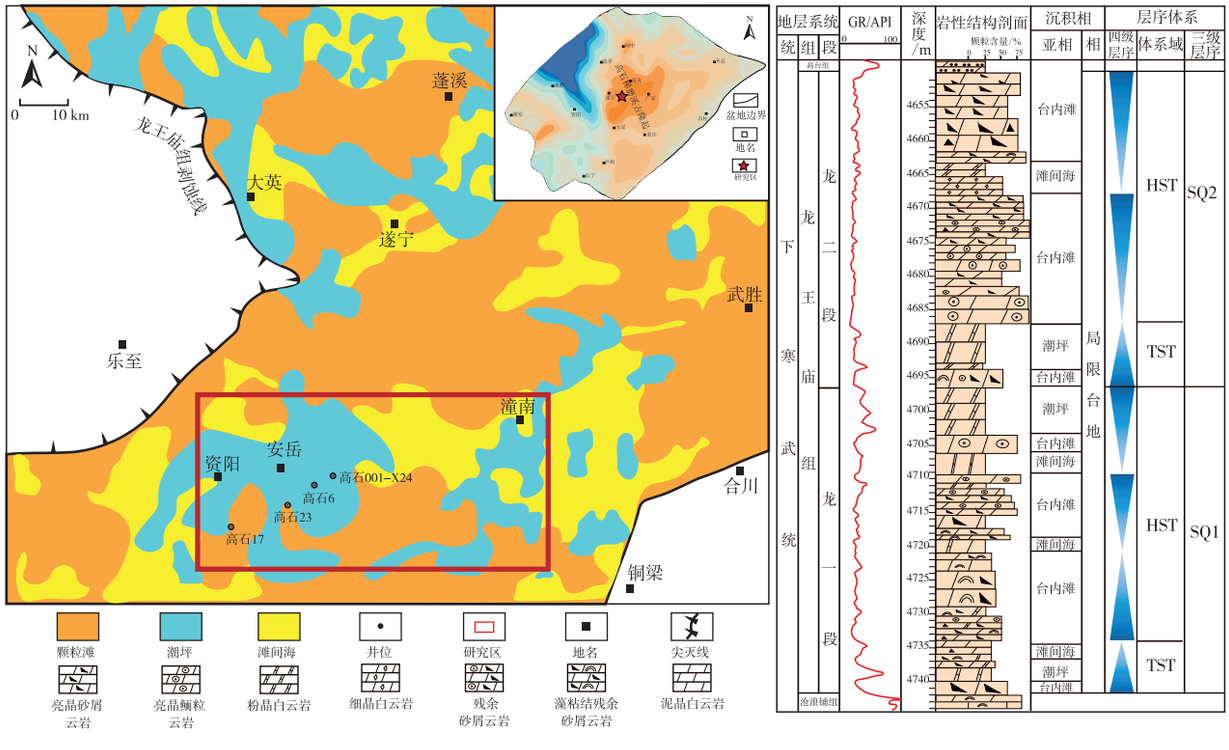


图 1　川中高石梯—磨溪古隆起寒武系龙王庙组岩相古地理图（左）（据田艳红等，2014）及高石 23 井综合柱状图（右）

Fig. 1　Lithofacies palaeogeographic map of the Cambrian Longwangmiao Formation in Gaoshiti-Moxi paleouplift, central Sichuan Basin (left) (after Tian *et al.*, 2014), and comprehensive stratigraphic column of Well GS23 (right)

2024)，因此文中主要研究了准层序中含有不同类型颗粒滩的 4 种典型微相组合。

2.1 砂屑滩—鲕粒滩型

该类准层序底部通常为数十厘米厚的残余砂屑云岩，向上变为亮晶鲕粒云岩，沉积厚度 1~2 m，主要发育在高石 6 井龙二段中上部。推测沉积环境为中低能砂屑滩，随水体变浅过渡为高能鲕粒滩。

下部的残余砂屑云岩具残余颗粒结构，呈深灰色，通常以厘米级条带出现(图 2-a)。镜下可观察到不同粒径的砂屑及少量陆源石英屑，颗粒含量 50%~60%，分选较差，粒径主要为 0.3~1.3 mm，呈椭圆状，颗粒间充填亮晶白云石胶结物。整体发育极少量沥青质全充填的粒内溶孔、粒间溶孔，孔径通常小于 50 μm (图 2-b；图 3)。

上部的亮晶鲕粒云岩颜色较浅，可观察到缝合线(图 2-a)。鲕粒含量 75%~90%，呈圆球状，分选中等，粒径主要为 0.4~0.9 mm。鲕粒内部常见白云石晶粒，整体发育由少量胶结物和沥青充填的粒间溶孔，及少量粒内溶孔(图 2-c；图 3)。

2.2 滩间海—砂屑滩型

该类准层序下部为含砂屑泥晶云岩，向上变为亮晶砂屑云岩 (图 2-d，2-e)，沉积厚度 1~3 m，发育在高石 001-X24 井龙二段上部。推测沉积环境为滩间海过渡为高能砂屑滩。

下部的含砂屑泥晶云岩颜色较深，常发育泥质条纹(图 2-d)。颗粒含量 20%~25%，呈椭圆状，分选非常差，粒径主要为 0.1~1.3 mm。泥质含量整体较高，能够观察到砂屑颗粒轮廓，发育少量铸模孔，被白云石胶结物全充填(图 2-e，2-f；图 3)。

上部的亮晶砂屑云岩颜色较浅，发育少量裂缝(图 2-d)。颗粒含量 60%~80%，多呈椭圆状，分选中等，粒径主要为 0.2~0.6 mm。整体重结晶程度较高，仅可观察出颗粒幻影，发育粒间溶孔，溶孔孔径差异较大，部分溶孔充填白云石胶结物和沥青(图 2-e，2-g；图 3)。

2.3 砂屑滩—云坪型

该类准层序下部为藻黏结残余砂屑云岩，向上变为泥晶云岩，沉积厚度较小，单个微相组合厚度通常小于 1 m，主要发育在高石 23 井龙一段中下部。推测沉积环境为低能砂屑滩，随水体变浅过渡为云坪。

下部的藻黏结残余砂屑云岩颜色较浅，发育大量溶孔、溶洞(图 2-h)。镜下薄片中仅能观察到颗粒轮廓，呈椭圆状，含量 50%~60%，分选中等，粒径主要为 0.2~0.5 mm。发育大量孔径大小分异明显的粒间溶孔、粒内溶孔和晶间溶孔(图 2-i，2-j；图 3)。

上部的泥晶云岩颜色较深，岩性致密，表现为几厘米厚的泥质条纹(图 2-h)。镜下泥晶白云石晶粒致密，无明显孔隙发育(图 2-j；图 3)。

2.4 中—高能砂屑滩型

该类准层序整体为亮晶砂屑云岩，向上亮晶砂屑云岩的颗粒含量增多、粒径增大，厚度通常在 1~2 m 之间，主要发育在高石 001-X24 井龙二段中部。推测沉积环境为水体向上变浅的中—高能砂屑滩。

岩石标本上两者区别不明显。镜下薄片中，下部的亮晶砂屑云岩颗粒含量 50%~65%，分选较差，粒径主要为 0.1~0.5 mm，主要呈椭圆状、粒状；上部亮晶砂屑云岩颗粒含量 60%~80%，分选中等，粒径主要为 0.3~0.7 mm，呈椭圆状。整体发育粒间溶孔以及沥青充填的缝合线(图 2-k，2-l；图 3)。

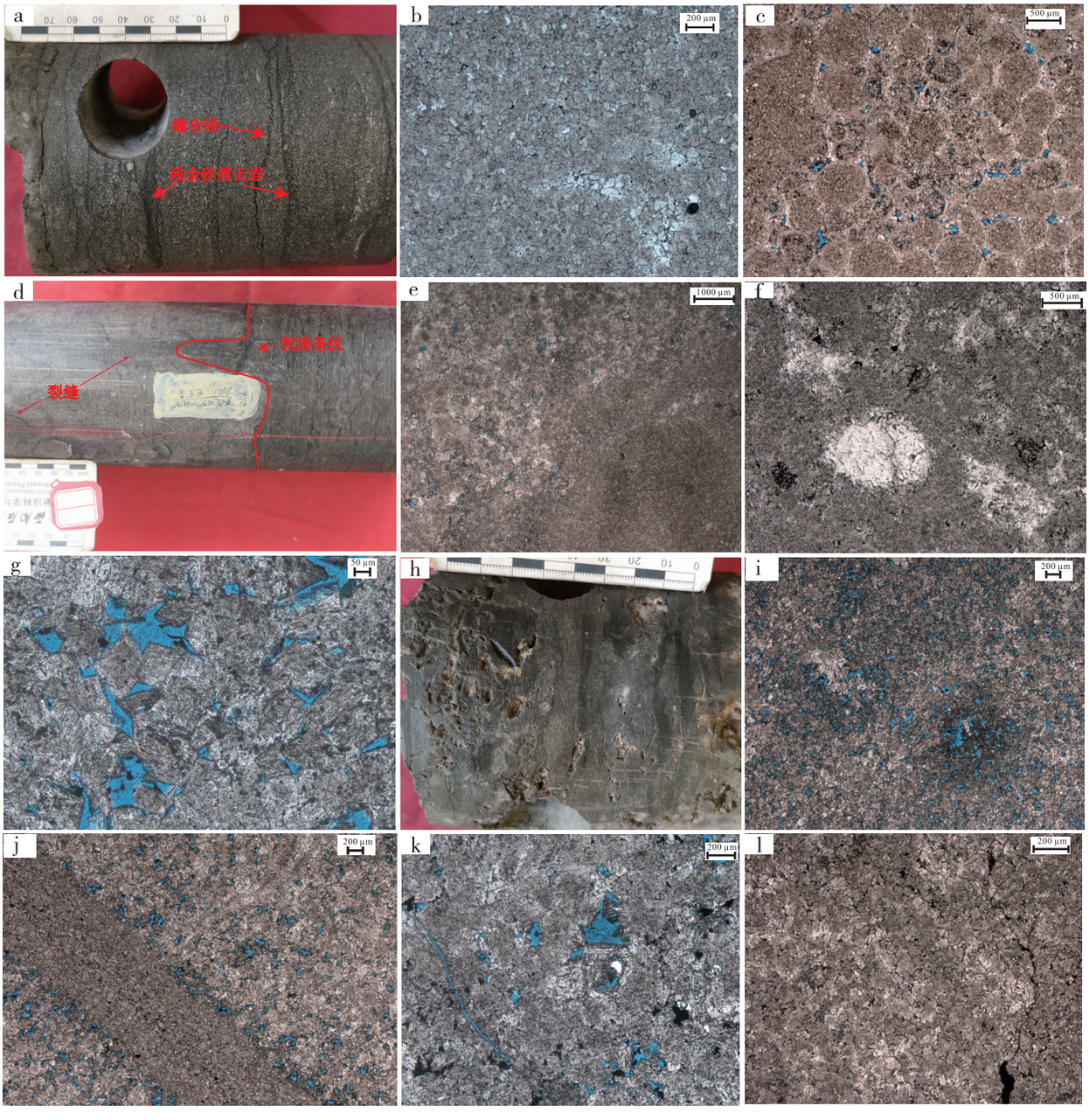
3 成岩作用

利用岩心观察和铸体薄片对 4 类微相组合内部岩石自下而上的成岩作用进行研究，发现造成不同微相组合孔隙差异性的主要成岩作用为溶蚀作用和胶结作用。在此基础上，分析了不同微相组合的主要成岩作用特征。

3.1 砂屑滩—鲕粒滩型

1) 溶蚀作用。下部残余砂屑云岩所受溶蚀作用较弱，仅存在少量被沥青充填的无效粒间孔(图 2-b)。上部亮晶鲕粒云岩发育大量大气淡水溶蚀形成的粒间溶孔以及少量局部富集的粒内溶孔，但埋藏期溶蚀作用较弱，仅对前期部分粉-细晶胶结物进行溶蚀(图 2-c；图 4-a)。

2) 胶结作用。下部残余砂屑云岩准同生期粉晶白云石胶结物将大部分孔隙全充填(图 2-b)。



a—鲕粒白云岩夹砂屑云岩，高石 23 井，4718.13 m；b—残余砂屑云岩，致密无孔，具陆源石英，4546.92 m，高石 6 井，单偏光；c—亮晶鲕粒云岩，发育粒间溶孔、粒内溶孔，高石 6 井，4546.55 m，单偏光；d—砂屑云岩，左边为高能砂屑滩，右为低能砂屑滩，高石 11 井，4579.70 m；e—左上为亮晶砂屑云岩，右下为含砂屑泥晶云岩，高石 23 井，4695.20 m，单偏光；f—含砂屑泥晶云岩，胶结物充填粒间溶孔、铸模孔，高石 001-X24 井，4731.76 m；g—亮晶砂屑云岩，发育大量粒间溶孔，高石 001-X24 井，4574.00 m，单偏光；h—藻粘结残余砂屑云岩与泥晶云岩互层，见大量溶孔、溶洞，高石 23 井，4724.56 m；i—藻粘结残余砂屑云岩，发育大小分明的粒间、粒内溶孔和晶间溶孔，高石 23 井，4727.52 m，单偏光；j—藻粘结残余砂屑云岩与泥晶云岩互层，见晶间孔，高石 23 井，4726.05 m；k—亮晶砂屑云岩，见粒间溶孔，高石 001-X24 井，4577.89 m，单偏光；l—亮晶砂屑云岩，无明显孔隙，高石 001-X24 井，4578.12 m，单偏光

图 2　四川盆地高石梯地区龙王庙组岩石特征

Fig. 2　Petrological characteristics of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

上部亮晶鲕粒云岩胶结物含量较少，可以识别出 3 期：第 1 期为准同生期海水环边胶结物，阴极发光下不发光；第 2 期为粉-细晶胶结物，主要形成于准同生期—浅埋藏期，阴极发光呈暗红色；第 3 期

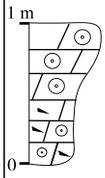
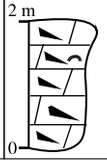
微相组合	典型井及发育层段	岩相组合	岩性类型	岩心特征	薄片特征	微相
砂屑滩—鲕粒滩型	高石6井 龙二段中部		亮晶鲕粒云岩	可见明显鲕粒，发育微裂缝、压溶缝、局部存在微裂缝	鲕粒含量75~90%，分选中等，粒径主要为0.4~0.9 mm，呈圆球状	高能鲕粒滩 中低能砂屑滩
			残余砂屑云岩	以深灰色厘米级条纹出现	颗粒含量50%~60%，分选较差，粒径主要为0.3~1.3 mm，呈椭圆状	
滩间海—砂屑滩型	高石001-X24井 龙二段上部		亮晶砂屑云岩	颜色较浅，存在裂缝，无明显孔隙	颗粒含量60%~80%，分选中等、粒径主要为0.2~0.6 mm，多呈椭圆状	高能砂屑滩 滩间海
			含砂屑泥晶云岩	颜色较深，含泥质条纹	颗粒含量20%~25%，分选非常差，粒径主要为0.1~1.3 mm，呈椭圆状、透镜状	
砂屑滩—云坪型	高石23井 龙一段中下部		泥晶云岩	颜色较深，以厘米级条纹出现	晶粒排列致密，无明显孔隙	云坪 低能砂屑滩
			藻粘结残余砂屑云岩	颜色较浅，发育大量孔洞	颗粒含量50%~60%，分选中等，粒径主要为0.2~0.5 mm	
中—高能砂屑滩型	高石001-X24井 龙二段中部		亮晶砂屑云岩	无明显特征	下部亮晶砂屑云岩颗粒含量50%~65%，分选较差，粒径主要为0.1~0.5 mm，主要呈椭圆状、粒状；上部亮晶砂屑云岩颗粒含量60%~80%，分选中等，粒径主要为0.3~0.7 mm，呈椭圆状	中高能砂屑滩

图 3 四川盆地高石梯地区龙王庙组不同微相组合沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of various microfacies assemblages of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

为中—深埋藏期中-粗晶胶结物，阴极发光呈亮红色（林雪梅等，2020；Jiang *et al.*，2023a，2023b；屈海洲等，2025）（图 4-b）。

3.2 滩间海—砂屑滩型

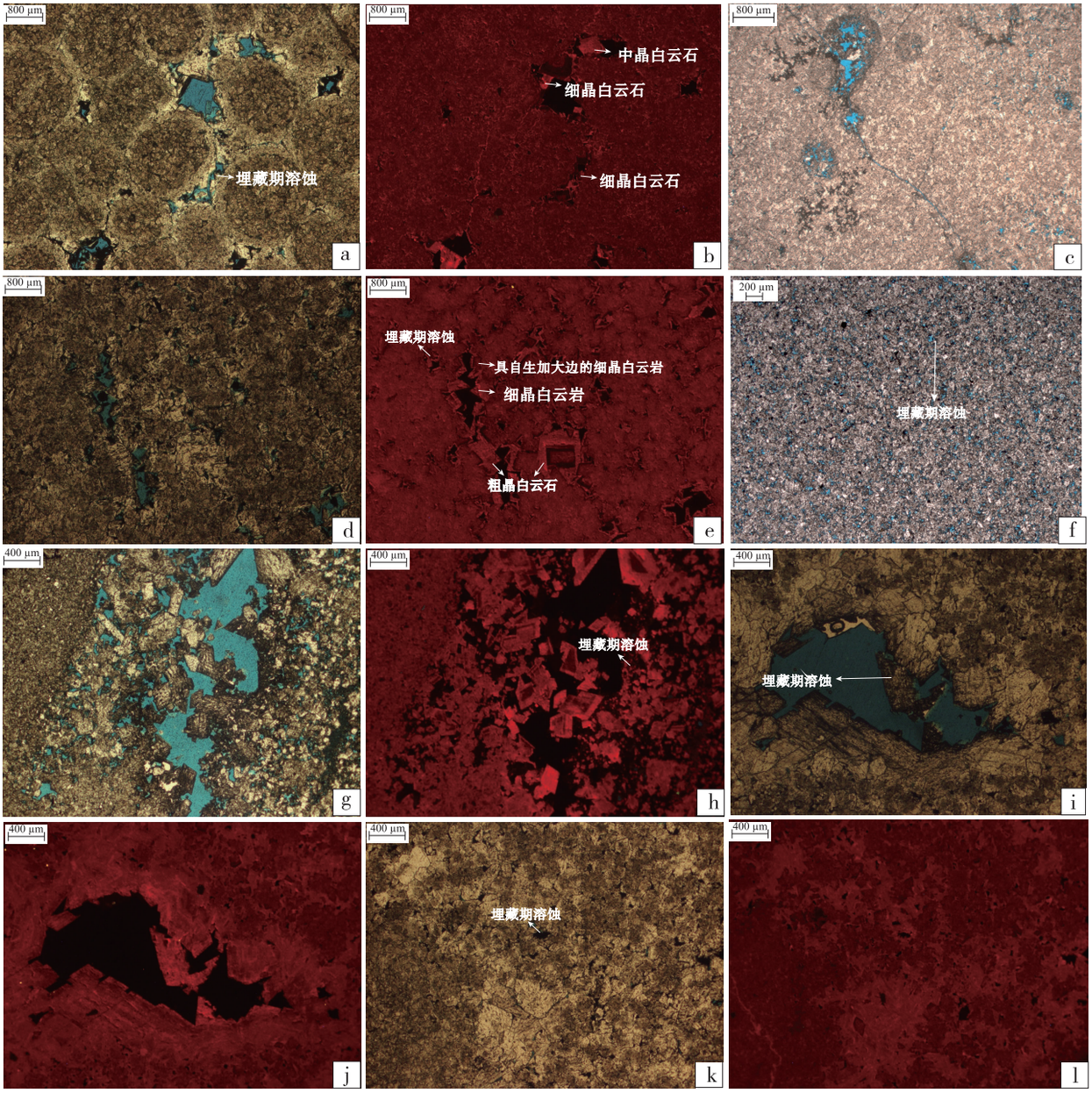
1）溶蚀作用。底部含砂屑泥晶云岩遭受大气淡水溶蚀作用较弱，发育少量沥青浸染、胶结物全充填的粒间孔、铸模孔等（图 2-f）。上部亮晶砂屑云岩遭受 2 期溶蚀作用：第 1 期为大气淡水溶蚀作用，产生大量粒间溶孔；第 2 期为中-深埋藏期溶蚀，主要是对部分前期孔隙进行扩溶增大，溶孔内充填中-粗晶胶结物或沥青（图 4-c，4-d，4-e）。

2）胶结作用。底部含砂屑泥晶云岩孔隙内主要充填少量准同生期和浅埋藏阶段的粉-细晶白云石胶结物，中—深埋藏期中-粗晶胶结物极少，主要发育在铸模孔中，由于晶体生长空间有限，所有胶结物以镶晶状全充填孔隙（图 2-f）。上部亮晶砂屑云岩胶结物含量高，可以识别出浅埋藏期细晶胶结物以及中埋藏阶段后的中-粗晶白云石，准同生期环边胶结物由于后期胶结持续生长，多数已经识别不清（图 4-d，4-e）。细晶胶结物的阴极发光分为 2 类，一类中心不发光，边缘呈暗红色，为准同生期粉晶白云石增大形成；另一类整体为暗红色，为浅埋藏期直接形成。中粗晶白云石阴极发光为亮红色或自内向外呈暗红色—暗色—亮红色的多期次次生加大白云石，为中埋藏阶段后形成或前期胶结物生长形成（林雪梅，2020；Jiang *et al.*，2023a，2023b）。

3.3 砂屑滩—云坪型

1）溶蚀作用。下部藻粘结残余砂屑云岩受到大气淡水溶蚀形成粒内溶孔、粒间溶孔；埋藏期溶蚀作用非常强，不仅将埋藏期形成的中-粗晶白云石胶结物和早期的粒间、粒内溶孔溶蚀，而且以早期溶孔为中心，对四周进行溶蚀，形成均匀分布的晶间溶孔（图 2-i；图 4-f，4-g）。上部泥晶云岩无明显溶蚀作用（图 2-j）。

2）胶结作用。下部藻粘结残余砂屑云岩主要发育中埋藏阶段后的中-粗晶白云石胶结物，充填在较大的粒间溶孔中，阴极发光呈中心较暗、外部



a—亮晶鲕粒云岩，高石 6 井，4545.59 m，单偏光；b—a 的阴极发光，发育 3 期胶结物；c—亮晶砂屑云岩，发育裂缝、铸模孔，高石 23 井，4662.45 m，单偏光；d—亮晶砂屑云岩，发育粒间溶孔，胶结物遭受溶蚀，高石 001-X24 井，4573.5 m，单偏光；e—d 的阴极发光；f—藻粘结残余砂屑云岩，发育晶间溶孔，高石 23 井，4528.5 m，单偏光；g—藻粘结残余砂屑云岩，发育粒间溶孔，高石 23 井，4525.85 m，单偏光；h—g 的阴极发光；i—亮晶砂屑云岩，胶结物遭受溶蚀，高石 001-X24 井，4584.47 m，单偏光；j—i 的阴极发光；k—亮晶砂屑云岩，镶嵌状胶结物发育，高石 001-X24 井，4584.47 m，单偏光；l—k 的阴极发光

图 4　四川盆地高石梯地区龙王庙组成岩作用特征

Fig. 4　Diagenetic characteristics of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

明亮的特点（林雪梅等，2020；Jiang *et al.*, 2023a, 2023b；屈海洲等，2025）（图 4-g，4-h）。上部泥晶云岩处于低能环境，晶体之间接触紧密，无明显胶结物（图 2-j）。

3.4　中—高能砂屑滩型

1）溶蚀作用。整体识别出 2 期溶蚀作用：大气淡水环境中亮晶砂屑云岩形成了大量的粒间溶孔

(图 4-i)；埋藏期溶蚀在水体能量弱的亮晶砂屑云岩中表现为胶结物的溶蚀，形成较小的粒间溶孔，多被沥青质充填(图 4-k)，而水体能量强的亮晶砂屑云岩中则主要是对前期溶孔进行扩溶，存在沥青质局部富集(图 2-k)。

2) 胶结作用。整体胶结作用都非常强，可以识别出 2 期白云石胶结物：一期为浅埋藏镶晶状细晶胶结物，通常充填在较小的孔隙中，阴极发光下为暗红色，在下部亮晶砂屑云岩中大量发育(图 4-k，4-l)；另一期为中—深埋藏环境中-粗晶白云石，通常充填在较大的孔隙中，阴极发光为亮红色(林雪梅等，2020；Jiang *et al.*，2023a，2023b；屈海洲等，2025)(图 4-i，4-j)。

综上所述，造成龙王庙组各微相组合孔隙差异性的主要成岩作用为溶蚀作用和胶结作用。而次要成岩作用中，准同生期渗透回流白云石化将原生灰岩大规模白云石化(刘大卫，2021；Li *et al.*，2024)，构造破裂作用在薄片中表现为产生少量构造缝(图 4-c)，压实、压溶作用则体现为颗粒的变形、压溶缝的发育(图 2-c，2-l)，重结晶作用主要表现为基质中白云石晶粒和胶结物的生长(图 4-e，4-h，4-j，4-l)。这类成岩作用在上述不同类型准层序中差异性较小，因此不作详细叙述。

4 孔隙特征

高石梯地区龙王庙组发育大量粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔。笔者利用 Image J 软件统计了 4 类微相组合的面孔率、平均孔径、胶结物含量、胶结物类型百分含量和孔隙类型百分含量等。

4.1 砂屑滩—鲕粒滩型孔隙特征

主要发育粒间溶孔和粒内溶孔。孔隙含量主要受早期胶结物影响，通常环边白云石胶结物、粉-细晶白云石胶结物占据多数孔隙，极大地降低了孔隙含量，中-粗晶白云石胶结物仅在局部发育，对孔隙影响较小。向上孔隙含量整体减少，平均孔径增大、胶结物含量减少，其中环边白云石、粉-细晶白云石胶结物相对减少，中-粗晶白云石相对增加。单个微相组合中，下部残余砂屑云岩仅发育少量残余粒间、粒内溶孔，溶孔孔径通常小于 40 μm，多数孔隙被粉-细晶白云石胶结物和沥青全充填，面孔率低于 1%(图 2-b)。上部亮晶鲕粒云岩主要发育粒间溶孔和粒内溶孔(图 2-c)。其中粒间溶孔平均孔径介于 200 ~300 μm 之间，胶结物含量通常低于 8%，主要为浅埋藏阶段之前的环边胶结物和粉-细晶胶结物，极少数孔隙中存在中-粗晶胶结物；粒内溶孔粒径通常小于 30 μm，含量极低，沥青质充填；面孔率通常介于 2%~6% 之间(图 5)。

4.2 滩间海—砂屑滩型孔隙特征

主要发育残余粒间孔。埋藏期胶结作用较强，

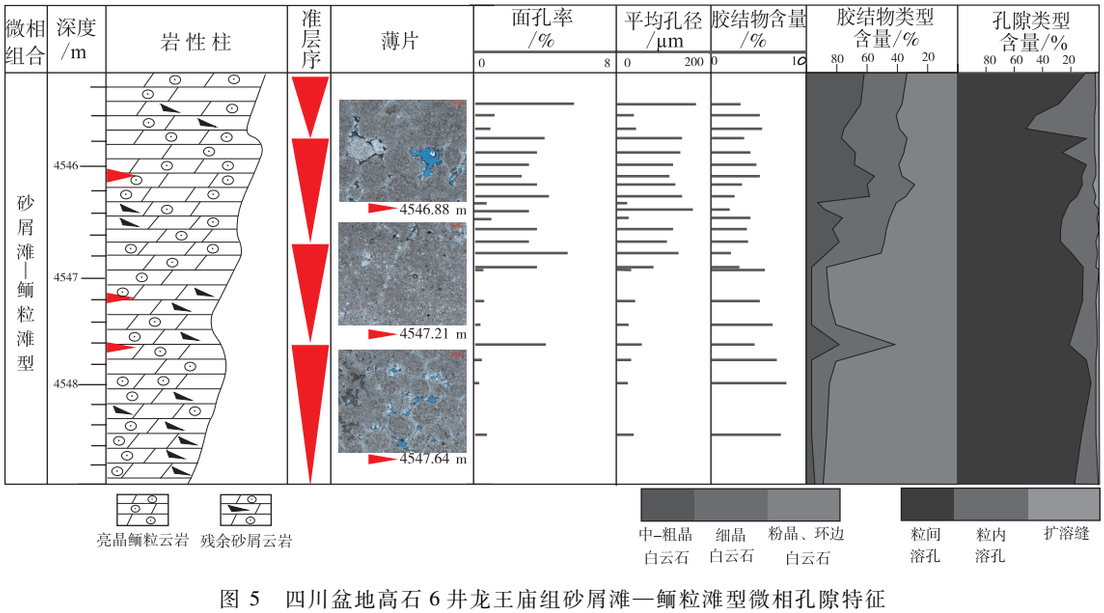


图 5 四川盆地高石 6 井龙王庙组砂屑滩—鲕粒滩型微相孔隙特征

Fig. 5 Pore characteristics of sandstone shoal-oolitic shoal microfacies of the Longwangmiao Formation in Well GS6, Sichuan Basin

发育大量中-粗白云石胶结物，整体呈向上孔隙含量降低、平均孔径减小、胶结物含量增加，其中中-粗晶白云石胶结物含量相对减少。单个微相组合中，下部含砂屑泥晶云岩的粒间溶孔和铸模孔多被胶结物、沥青全充填，面孔率低于 1%(图 2-f)。上部的亮晶砂屑云岩主要发育粒间溶孔以及少量铸模孔、微裂缝(图 4-e，4-g)，不同溶孔孔径差异较大，最大可达到 800 μm，平均孔径介于 100 ~ 200 μm 之间，其中充填的胶结物遭受过不同程度的溶蚀，胶结物含量通常为 7%~14%，面孔率介于 1.5%~5%之间(图 6)。

4.3　砂屑滩—云坪型孔隙特征

主要发育溶蚀作用形成的粒间溶孔、粒内溶孔和晶间孔。粒间溶孔和粒内溶孔是孔隙发育的基础，通常粒间溶孔和粒内溶孔越发育，孔隙含量越高，晶间孔也更为发育。单个微相组合中，下部的泥晶云岩中无明显孔隙、胶结物发育，整体岩性致密。上部的藻粘结残余砂屑云岩中发育孔径大小差异明显的 2 类孔隙：一类孔隙遭受 2 期溶蚀，孔径通常大于 200 μm，类型主要为粒间溶孔、粒内溶孔，胶结物多为遭受过强烈溶蚀的中-粗晶白云石，保留下来的有效孔隙极多(图 2-i；图 4-j)；另一类为孔径 30~50 μm 的晶间溶孔，孔隙内无明显胶结物充填，通常围绕粒间溶孔、粒内溶孔密集发育(图 2-i)。面孔率介于 2%~8%之间(图 7)。

4.4　中—高能砂屑滩型孔隙特征

主要发育残余粒间孔。镶晶状细晶白云石胶结物是影响孔隙发育的主要因素，其将多数粒间溶孔全充填，整体呈孔隙含量越高，平均孔径越大、胶结物含量越低、细晶白云石胶结物相对含量越少的特点。单个微相组合中，下部的亮晶砂屑云岩多数粒间溶孔被胶结物、沥青全充填，面孔率小于 2%，这在最后孔隙成因部分探讨。上部的亮晶砂屑云岩多数粒间溶孔孔径介于 100 ~ 200 μm 之间(图 2-k)，溶孔内充填沥青质和细晶白云石，有效孔隙保留较多；少数粒间溶孔孔径能够达到 300 μm 以上，溶孔内中-粗晶白云石半充填(图 4-i)；整体面孔率介于 1.4% ~ 5.8% 之间(图 8)。

5　准层序孔隙成因差异性探讨

综上，高石梯地区龙王庙组 4 类微相组合经历的溶蚀作用、胶结作用具有明显的差异性（图 9 至图 12)。依据行业标准“碳酸盐岩成岩阶段划分”(SY/T5478-2019) 的方案，基于龙王庙组埋藏史（张涛等，2022）及文中成岩作用的研究，将龙王庙组成岩阶段划分为准同生成岩阶段（海水环境、大气淡水环境、蒸发环境)、早成岩阶段

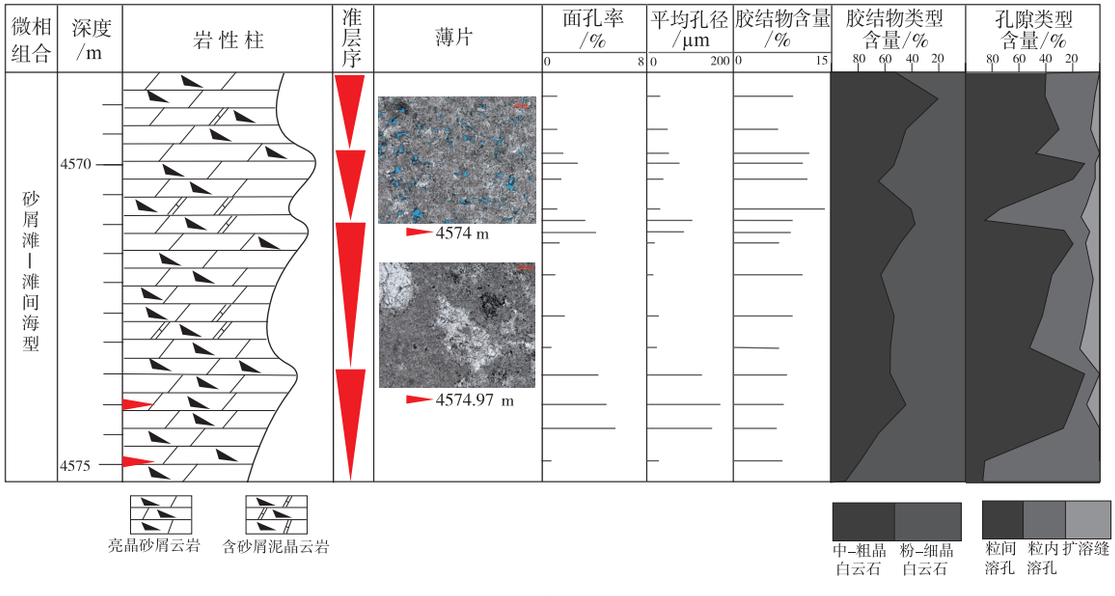


图 6　四川盆地高石 001-X24 井龙王庙组滩间海—砂屑滩型微相组合孔隙特征

Fig. 6　Pore characteristics of intershoal sea-sandstone shoal microfacies of the Longwangmiao Formation in Well GS 001-X24, Sichuan Basin

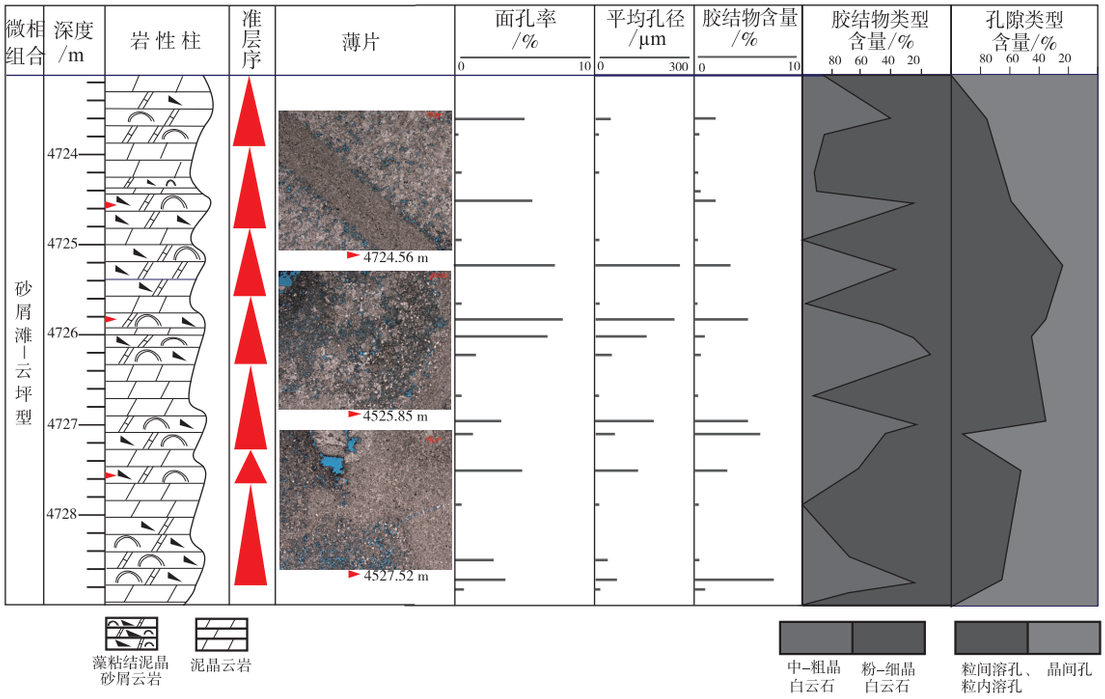


图 7 四川盆地高石 23 井龙王庙组砂屑滩—云坪型微相组合孔隙特征

Fig. 7 Pore characteristics of sandstone shoal-dolomite flat microfacies of the Longwangmiao Formation in Well GS 23, Sichuan Basin

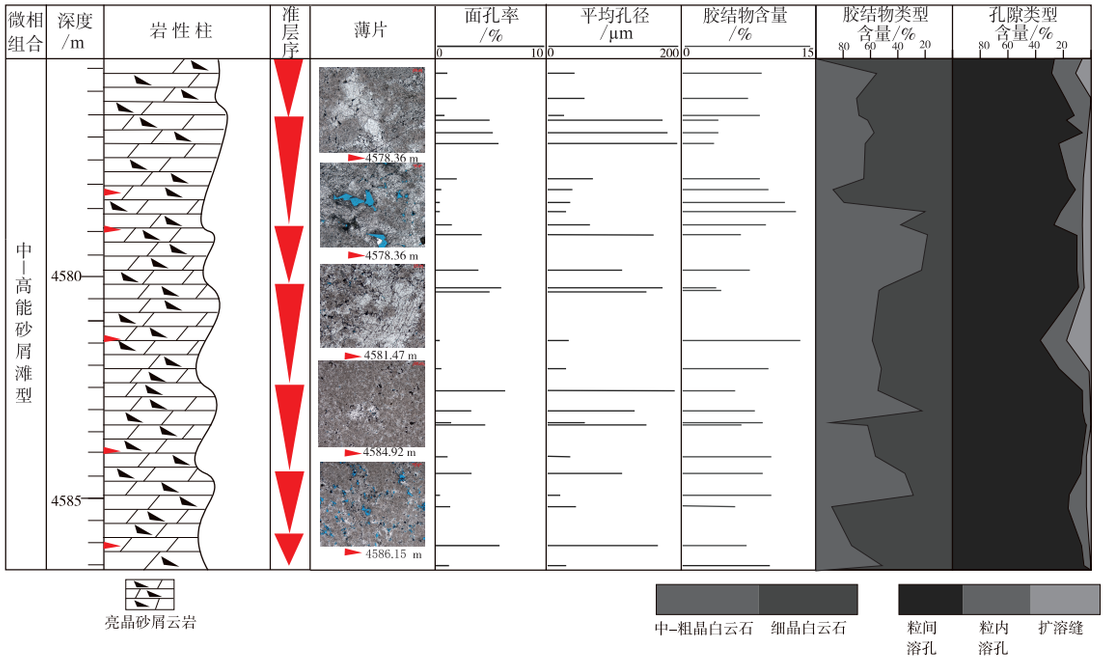


图 8 四川盆地高石 001-X24 井龙王庙组中高能砂屑滩型微相组合孔隙特征

Fig. 8 Pore characteristics of high-energy sandstone shoal microfacies of the Longwangmiao Formation in Well GS 001-X24, Sichuan Basin

浅埋藏环境、中—晚成岩阶段中—深埋藏环境(克莱德, 2009)。不同成岩阶段中不同准层序的溶蚀作用、胶结作用有所差异, 故将对不同准层序的孔隙演化过程进行详细描述和定量表征。储集层

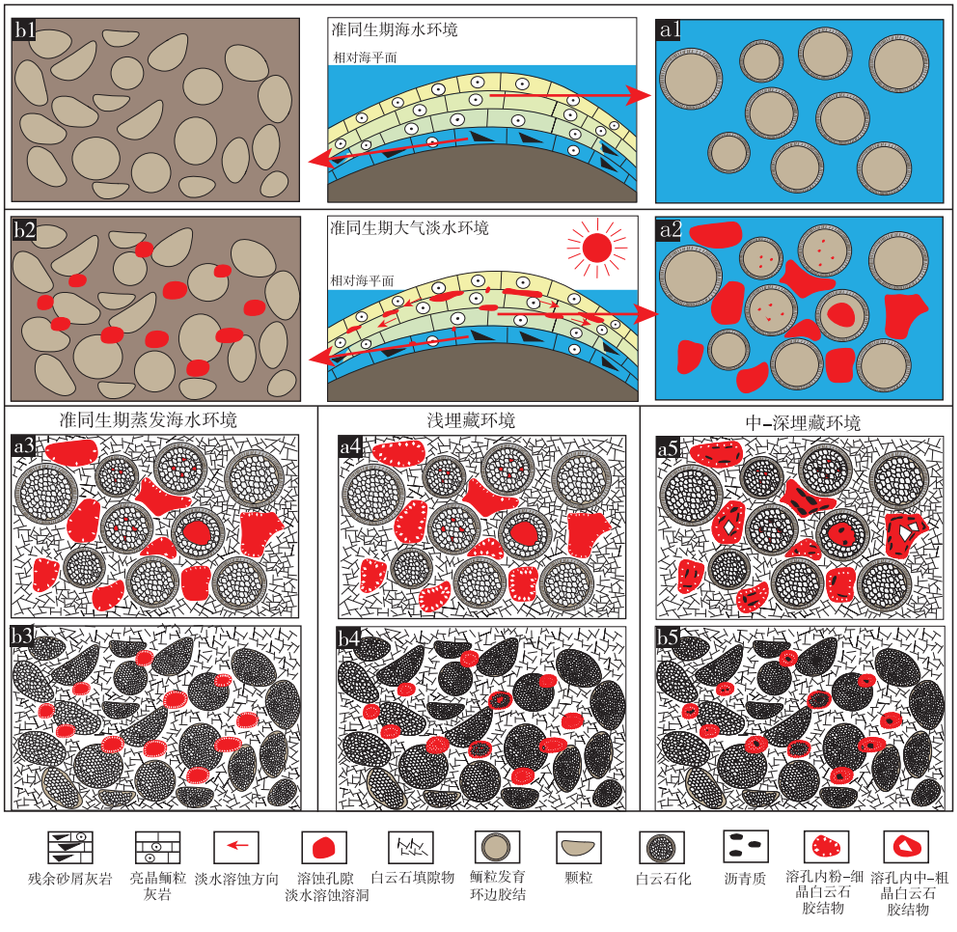
原始孔隙度只能以推测为主（王强，2022；李毕松等，2023；钱一雄等，2023），在沉积、成岩过程中由于脱离海水环境及深度而造成的压实减孔效应无法定量表征，而胶结作用造成的减孔效应则以胶结物含量进行定量统计，溶蚀作用期次则根据溶孔形态、胶结物溶蚀程度进行区分，故本次定量数据以前期统计的“总孔隙度（胶结物含量+面孔率）”和“有效孔隙度（面孔率）”为主。

5.1　砂屑滩—鲕粒滩型

该类准层序上部亮晶鲕粒云岩的总孔隙度为10%~14.1%，有效孔隙度介于2%~6%之间，下部残余砂屑云岩总孔隙度则为6%~8%，有效孔隙度低于1%（图5；图13-a）。

1）准同生期。由于上、下部岩石的水体能量差异大，导致在准同生期海水成岩环境中上部的亮晶鲕粒灰岩具有较高的原始孔隙度，而下部的砂屑质泥晶灰岩原始孔隙较少（图9-a1，9-b1）。明显的原始孔隙差异使得大气淡水环境下，下部岩石充当物理隔夹层（Yang *et al.*，2024），大气淡水溶蚀在亮晶鲕粒云岩中以水平溶蚀为主，形成大量粒间溶孔和少量孔径小于50 μm的粒内溶孔，对有效孔隙度贡献约70%（图9-b2）；下部仅在局部形成少量的铸模孔、粒间溶孔，对残余砂屑云岩有效孔隙度贡献在90%以上（图9-a2）。准同生期蒸发环境发生渗透回流白云石化作用，将所有岩石规模白云石化，同时使前期环边胶结物厚度增大和形成少量粉晶胶结物，将较小的粒间溶孔全充填（图4-d；图9-a3，9-b3）。

2）早成岩阶段。浅埋藏阶段，主要发生胶结作用，形成细晶白云石胶结物，在经历准同生期和该



a—亮晶鲕粒云岩演化过程；b—残余砂屑云岩演化过程

图9　四川盆地高石梯地区龙王庙组砂屑滩—鲕粒滩型成岩演化过程

Fig. 9　Diagenetic evolution process of sandstone shoal-oolitic shoal microfacies of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

时期胶结作用之后，下部的残余砂屑云岩孔隙几乎被全充填，造成的减孔效应达到 5%~7%之间，上部亮晶鲕粒云岩则减孔 3%~7%(图 9-a4，9-b4)。

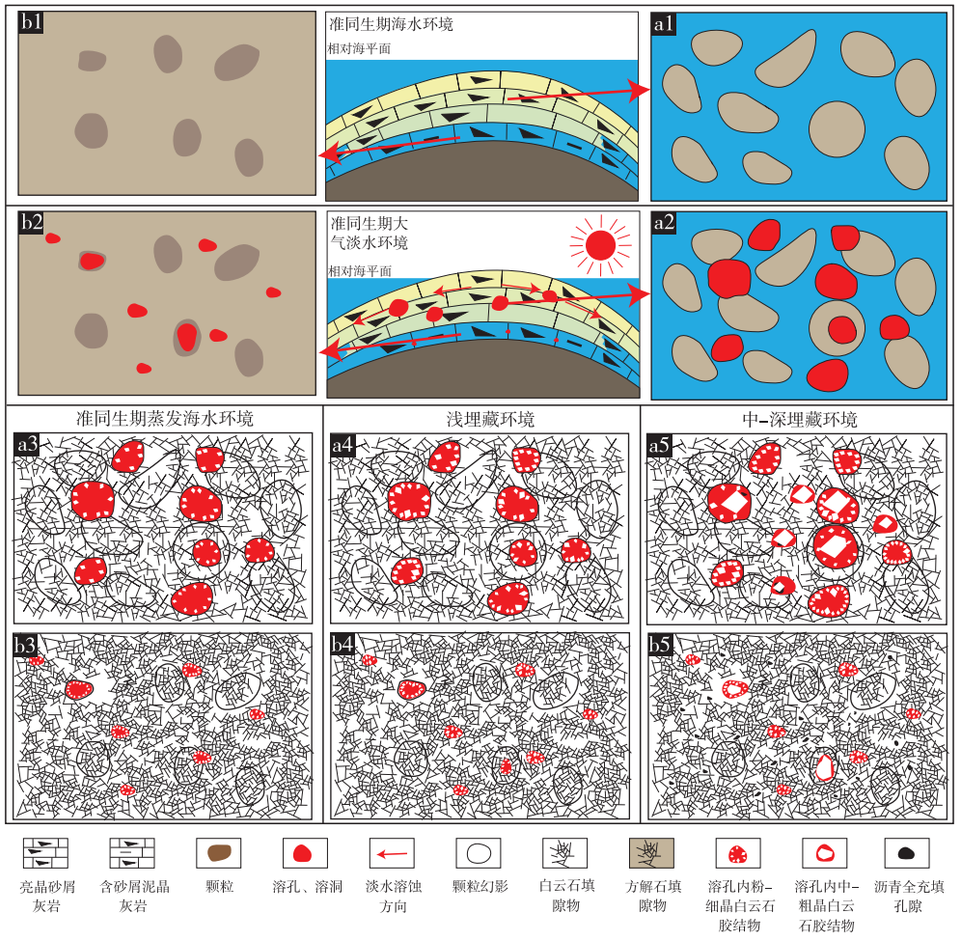
3）中—晚成岩阶段。中—深埋藏阶段，下部残余砂屑云岩仅发生少量沥青充填(图 9-b5)。上部亮晶鲕粒云岩前期发生烃类充注，随后发生烃类裂解，产生有机酸与残留沥青（刘大卫等，2020，2023；林潼等，2022），对前期粉、细晶胶结物进行溶蚀(图 4-a)，对有效孔隙度的贡献约 30%。后期发生胶结作用，热液流体在部分亮晶鲕粒云岩粒间溶孔中沉淀出少量中—粗晶白云石胶结物，减孔 2%~4%(图 4-a；图 9-a5)。

5.2 滩间海—砂屑滩型

该类准层序上部亮晶砂屑云岩总孔隙度为 8.8%~15.9%，有效孔隙度介于 1.5%~5%之间，下部含砂屑泥晶云岩总孔隙度为 7%~9%，有效孔隙度低于 1%(图 6；图 13-b)。

1）准同生期。上部、下部岩石在海水环境中原始孔隙度差异明显(图 10-a1，10-b1)。大气淡水环境下，上部亮晶砂屑云岩产生大量粒间溶孔和少量粒内溶孔(图 10-a2)，对有效孔隙度的贡献约 65%，下部含砂屑泥晶云岩则产生更多粒内溶孔（图 2-f；图 10-b2），对有效孔隙度的贡献约 80%。蒸发海水环境中，渗透回流白云石化往往伴随强烈的胶结作用，形成大量粉晶胶结物，由于孔隙含量差异性，其主要充填在上部亮晶砂屑云岩中，下部含砂屑泥晶云岩中较少见(图 2-e；图 10-a3，10-b3)。

2）早成岩阶段。浅埋藏环境中，上部亮晶砂



a—亮晶砂屑云岩演化过程；b—含砂屑泥晶云岩演化过程

图 10 四川盆地高石梯地区龙王庙组滩间海—砂屑滩型微相组合成岩演化过程

Fig. 10 Diagenetic evolution process of intershoal sea-sandstone shoal microfacies of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

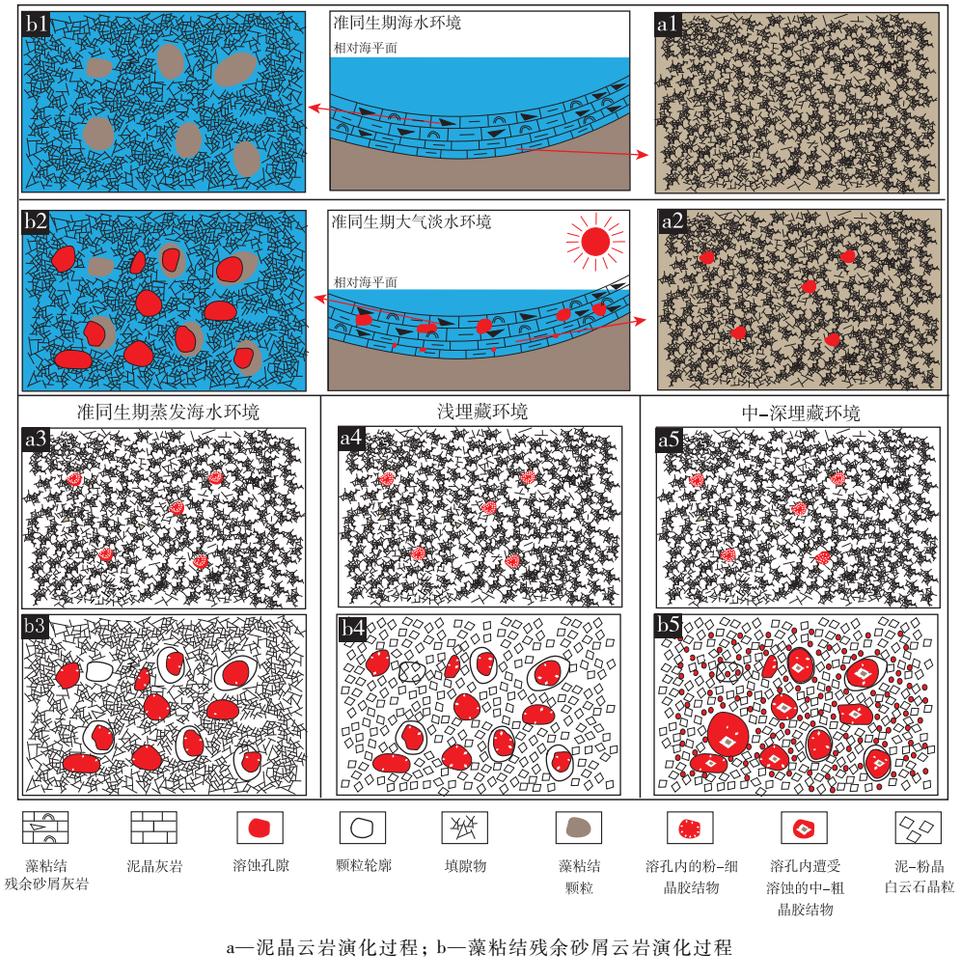
屑云岩经历了胶结作用，先期粉晶白云石胶结物生长为细晶白云石或先期残余流体继续沉淀出细晶胶结物(图 10-a3)，这类细晶胶结物和先期残留粉晶胶结物造成的减孔效应达到 4%~6%(图 6)。下部含砂屑泥晶云岩胶结作用形成的细晶胶结物将大部分孔隙全充填，仅存在少量铸模孔(图 10-b3)，粉-细晶胶结物造成的减孔效应达到 5%~8%(图 6)。

3）中—晚成岩阶段。中—深埋藏环境，上部亮晶砂屑云岩前期发生油气充注，随后裂解的有机酸和热液流体（刘大卫等，2020，2023；林潼等，2022）共同对前期胶结物进行溶蚀，对有效孔隙度的贡献约 35%，同时残留部分沥青质(图 4-d)。后期热液流体在较大孔隙中形成大量中-粗晶白云石胶结物(图 10-a5)，造成的减孔效应达到 5%~7.5%(图 2-e；图 4-d；图 5)。下部含砂屑泥晶云岩中，有机酸和热液流体主要溶蚀前期胶结物，形成少量孔径小于 50 μm、沥青全充填的粒间溶孔，对有效孔隙度的贡献约 20%，同时胶结作用形成的镶嵌状粗晶白云石胶结物将前期残留铸模孔全充填(图 10-b5)，由于本身有效孔隙极少，造成的减孔效应仅 2%~3%(图 2-f；图 5)。

5.3　砂屑滩—云坪型

该类准层序上部泥晶云岩岩性致密，总孔隙度和有效孔隙度都非常低。下部藻黏结残余砂屑云岩总孔隙度为 9.8%~13.7%，有效孔隙度介于 2%~8%之间(图 7；图 13-c)。

1）准同生期。由于沉积在低能环境，海水成岩环境中该类准层序整体原始孔隙含量较低(图 11-a1，11-b1)。而在大气淡水环境中，上部泥晶云岩几乎不产生溶孔(图 11-a2)，下部藻黏结砂屑质



a—泥晶云岩演化过程；b—藻粘结残余砂屑云岩演化过程

图 11　四川盆地高石梯地区龙王庙组砂屑滩—云坪型微相组合成岩演化过程

Fig. 11　Diagenetic evolution process of sandstone shoal-dolomite flat microfacies of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

泥晶灰岩由于溶蚀有机质形成大量的粒间溶孔、粒内溶孔(图 11-b2)，对有效孔隙度的贡献能够达到 50%以上。蒸发环境中，在渗透回流白云石化作用下转变为泥晶云岩和藻黏结残余砂屑云岩，由于白云石化流体在穿过上覆灰岩后缺乏 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-}，因此白云石胶结作用较弱(图 11-b3)，但上部泥晶云岩由于本身岩性致密，形成的少量粉晶胶结物占据了大部分孔隙(图 11-a3)，故后期成岩作用非常微弱(图 11-a4，11-a5)。

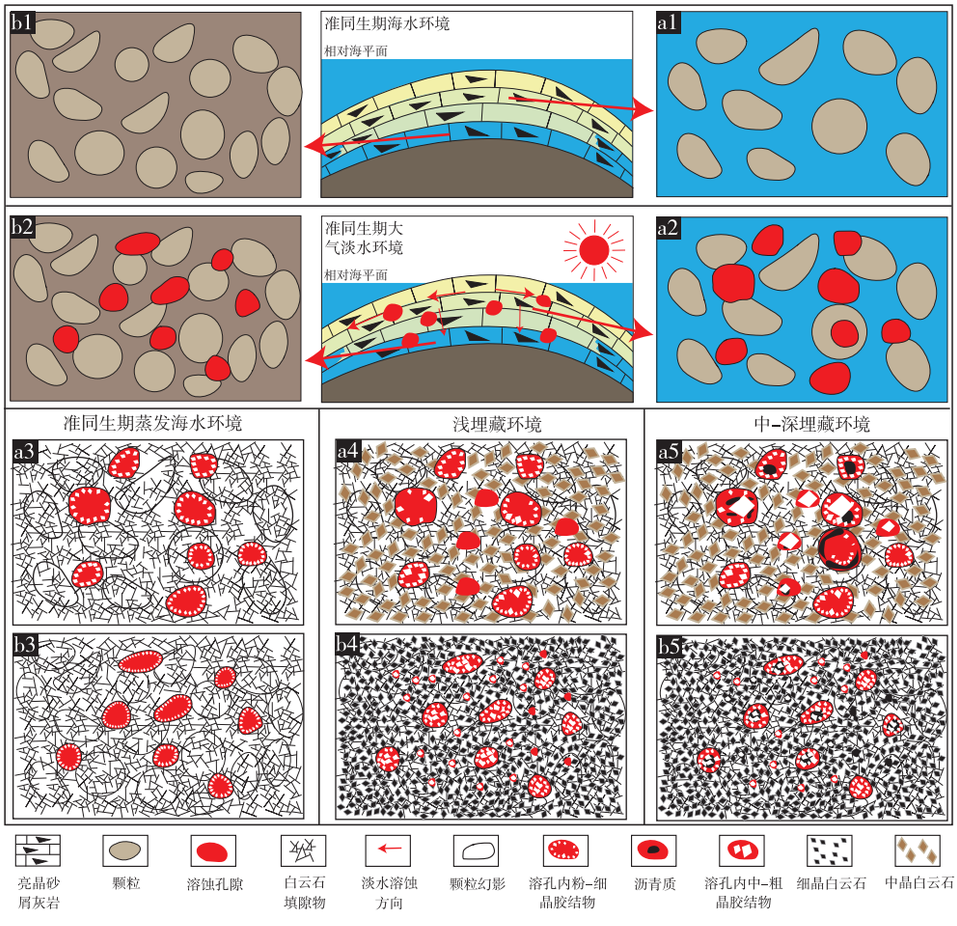
2）早成岩阶段。浅埋藏环境，藻黏结残余砂屑云岩由于胶结作用产生少量细晶胶结物(图 11-b4)，这类细晶胶结物和前期粉晶胶结物造成的减孔效应在 2%~3%之间。

3）中—晚成岩阶段。中—深埋藏环境，油气充注较弱，因此溶蚀作用主要依靠热液流体（刘大卫等，2020，2023；林潼等，2022），下部的藻黏结残余砂屑云岩先对早期形成的粒间、粒内溶孔进行溶蚀，同时产生少量中—粗晶白云石胶结物，约占总孔隙度的 3%~4%；经过溶蚀后上述溶孔孔径通常能够达到 200 μm 以上，后期围绕这些早期溶孔周围和溶孔内部的胶结物进行溶蚀，形成大量孔径小于 50 μm 的晶间溶孔(图 11-b5)，这些晶间溶孔对有效孔隙度的贡献约 50%(图 2-i；图 4-f)。

5.4 中—高能砂屑滩型

该类微相组合上部亮晶砂屑云岩总孔隙度为 9.4%~13.8%，有效孔隙度介于 1.4%~5.8%之间，下部亮晶砂屑云岩总孔隙度为 11.4%~14.7%，有效孔隙度介于 1%~2%之间(图 8；图 13-d)。

1）准同生期。海水成岩环境中，上、下岩性原始孔隙含量差异较小(图 12-a1，12-b1)，大气



a—水体能量较强的亮晶砂屑云岩演化过程；b—水体能量较弱的亮晶砂屑云岩演化过程

图 12 四川盆地高石梯地区龙王庙组中—高能砂屑滩型微相组合成岩演化过程

Fig. 12 Diagenetic evolution process of medium-high energy sandstone shoal microfacies of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

微相组合	岩石类型	总孔隙度/%	不同成岩阶段主要成岩作用对孔隙度的贡献率			有效孔隙度/%
			准同生期	早成岩阶段	中–晚成岩阶段	
砂屑滩–鲕粒滩型（a）	亮晶鲕粒云岩	10.0~14.1	大气淡水溶蚀：70% 粉–细晶胶结物：5%~7%		埋藏期溶蚀：30% 中–粗晶胶结物：2%~4%	2~6
	残余砂屑云岩	2~6	大气淡水溶蚀：90% 粉–细晶胶结物：5%~7%		埋藏期溶蚀：10% 中–粗晶胶结物：2%~4%	小于1%
滩间海–砂屑滩型（b）	亮晶砂屑云岩	8.8~15.9	大气淡水溶蚀：65% 粉–细晶胶结物：4%~6%		埋藏期溶蚀：35% 中–粗晶胶结物：5%~7.5%	1.5~5
	含砂屑泥晶云岩	7~9	大气淡水溶蚀：80% 粉–细晶胶结物：5%~8%		埋藏期溶蚀：20% 中–粗晶胶结物：2%·3%	低于1%
砂屑滩–云坪型（c）	泥晶云岩	极低				极低
	藻黏结残余砂屑云岩	9.8~13.7	大气淡水溶蚀：50% 粉–细晶胶结物：2%~3%		埋藏期溶蚀：50% 中–粗晶胶结物：3%~4%	2~8
中–高能砂屑滩型（d）	亮晶砂屑云岩	9.4~13.8	大气淡水溶蚀：40% 粉–细晶胶结物：5%~8%		埋藏期溶蚀：60% 中–粗晶胶结物：4%~6%	1.4~5.8
	亮晶砂屑云岩	11.4~14.7	大气淡水溶蚀：90% 粉–细晶胶结物：7%~11%		埋藏期溶蚀：10% 中–粗晶胶结物：3%~5%	1~2

注：　代表溶蚀作用对于有效孔隙度的贡献率　　代表胶结物减少的孔隙度

图 13　四川盆地高石梯地区龙王庙组不同微相组合孔隙演化

Fig. 13　Pore evolution processe in various microfacies assemblages of the Longwangmiao Formation in Gaoshiti area, Sichuan Basin

淡水环境中溶蚀作用存在垂直和水平方向的溶蚀，发育大量的粒间溶孔，这个阶段的粒间溶孔孔径多在 200 μm 以下（图 12–a2，12–b2），对上部亮晶砂屑云岩有效孔隙度贡献约 40%，下部则达到约 90%。在蒸发海水环境中，经历了白云石化和强烈的胶结作用形成大量粉晶胶结物，整体的孔隙含量差异并不明显（图 12–a3，12–b3）。

2）早成岩阶段。浅埋藏环境，整体遭受了强烈的胶结作用，发育镶晶状细晶白云石胶结物（图 12–a4，12–b4），自下而上胶结物含量增加，下部亮晶砂屑云岩粉–细晶胶结物造成的减孔效应达到 7%~11%，上部则只有 5%~8%。

3）中—晚成岩阶段。中—深埋藏环境，充注的油气裂解后形成的有机酸与热液流体（刘大卫等，2020，2023；林潼等，2022）对前期胶结物进行溶蚀，上部亮晶砂屑云岩将前期溶孔进一步扩溶增大，通常能够达到 200 μm 以上，对有效孔隙度的贡献约 60%，同时热液流体形成的大量中–粗晶白云石胶结物充填在扩溶孔中（图 12–a5），造成的减孔效应在 4%~6%之间（图 4–j）。下部亮晶砂屑云岩形成孔径小于 90 μm 溶孔（图 4–k），对有效孔隙度的贡献约 10%，同时形成少量镶晶状中–粗晶胶结物（图 4–k；图 12–b5），造成的减孔效应在 3%~5%之间。

6　结论

1）依据有利微相，在四川盆地高石梯地区寒武系第二统龙王庙组准层序中划分出具有不同滩体的 4 种微相组合：砂屑滩—鲕粒滩型，下部为残余砂屑云岩，向上变为亮晶鲕粒云岩；滩间海—砂屑滩型，下部为含砂屑泥晶云岩，向上变为亮晶砂屑云岩；砂屑滩—云坪型，下部为藻粘结残余砂屑云岩，向上变为泥晶云岩；中—高能砂屑滩型，由自下而上水体能量增加的亮晶砂屑云岩组成。

2）4 类微相组合经历的溶蚀作用和胶结作用具有明显差异性。大气淡水溶蚀作用主要发生在前 3 类微相组合上部岩石和整个中—高能砂屑滩型，中—深埋藏期溶蚀作用则主要发生在除砂屑滩—鲕粒滩型之外的 3 类微相组合上部岩石中。4 类微相组合中都存在一定的胶结作用，但在滩间海—砂屑滩型上部岩石和整个中—高能砂屑滩型中表现尤为突出。

3）4 类微相组合孔隙发育的关键成岩阶段和作用不同，孔隙含量差异性主要表现在微相组合上部岩石。砂屑滩—鲕粒滩型主要发育受大气淡水溶蚀作用控制的粒间、粒内溶孔，面孔率介于 2%~

6%之间；滩间海—砂屑滩型的粒间溶孔由于中-粗白云石胶结物的大量充填，孔隙发育最弱，面孔率介于 1.5%~5%之间；砂屑滩—云坪型遭受大气淡水溶蚀、埋藏期溶蚀作用，发育大小分异明显的粒间、粒内溶孔和晶间溶孔 2 类溶孔，孔隙最为发育，面孔率介于 2%~8%之间；中—高能砂屑滩发育由大气淡水溶蚀、埋藏期溶蚀作用形成的大量细晶胶结物充填的残余粒间孔，面孔率介于 1.4%~5.8%之间。

参考文献(References)

Catuneanu O,著；吴因业,译. 2009.层序地层学原理. 北京：石油工业出版社，228-234.［Catuneanu O；Wu Y Y translated. 2009. Principles of Sequence Stratigraphy. Beijing：Petroleum Industry Press，228-234］

车国琼,詹旗胜,汪轰静,范玲,王安琪,李昱翰. 2021. 川中龙女寺地区寒武系龙王庙组白云岩储层特征. 中外能源,26(12)：35-42.［Che G Q，Zhan Q S，Wang H J，Fan L，Wang A Q，Li Y H. 2021. Characteristics of dolomite reservoirs from Cambrian Longwangmiao Formation in Longnvsi area，central Sichuan Basin. Sino-Global Energy，26(12)：35-42］

杜金虎,张宝民,汪泽成,邹才能,徐春春,沈平,张健,张静,周慧,姜华,文龙,单秀琴,刘静江. 2016. 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. 天然气工业,36(6)：1-10.［Du J H，Zhang B M,Wang Z C，Zou C N，Xu C C，Shen P，Zhang J，Zhang J，Zhou H，Jiang H，Wen L，Shan X Q，Liu J J. 2016. Sedimentary model and reservoir genesis of dual grain banks at the Lower Cambrian Longwangmiao Fm carbonate ramp in the Sichuan Basin. Natural Gas Industry，36(6)：1-10］

高达,胡明毅,李安鹏,杨威,谢武仁,孙春燕. 2021. 川中地区龙王庙组高频层序与沉积微相及其对有利储层的控制. 地球科学,46(10)：3520-3534.［Gao D,Hu M Y，Li A P，Yang W，Xie W R，Sun C Y. 2021. High-frequency sequence and microfacies and their impacts on favorable reservoir of Longwangmiao Formation in central Sichuan Basin. Earth Science，46(10)：3520-3534］

韩波,何治亮,任娜娜,田海芹,马强. 2018. 四川盆地东缘龙王庙组碳酸盐岩储层特征及主控因素. 岩性油气藏，30(1)：75-85.［Han B，He Z L，Ren N N，Tian H Q，Ma Q. 2018. Characteristics and main controlling factors of carbonate reservoirs of Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin. Lithologic Reservoirs，30(1)：75-85］

金民东,谭秀成,曾伟,李凌,李宗银,罗冰,张静蕾,洪海涛. 2016. 四川盆地磨溪—高石梯地区加里东—海西期龙王庙组构造古地貌恢复及地质意义. 沉积学报,34(4)：634-644.［Jin M D,Tan X C,Zeng W,Li L,Li Z Y，Luo B，Zhang J L，Hong H T. 2016. Reconstruction of the tectonic palaeogeomorphology of Longwangmiao Formation during the Caledonian-Hercynian Period in Moxi-Gaoshiti area，Sichuan Basin and its geological significance. Acta Sedimentologica Sinica，34(4)：634-644］

金民东,曾伟,谭秀成,李凌,李宗银,罗冰,张静蕾,刘吉伟. 2014. 四川磨溪—高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素. 石油勘探与开发,41(6)：650-660.［Jin M D,Zeng W,Tan X C,Li L，Li Z Y，Luo B，Zhang J L，Liu J W. 2014. Characteristics and controlling factors of beach-controlled karst reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation，Moxi-Gaoshiti area，Sichuan Basin，NW China. Petroleum Exploration and Development,41(6)：650-660］

克莱德 H 莫尔，著. 吴因业，译. 2009. 碳酸盐岩储层层序地层格架中的成岩作用和孔隙演化. 北京：石油工业出版社，54-56.［Clyde H M. Wu Y Y，translated. 2009. Carbonate Reservoirs：Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Beijing：Petroleum Industry Press，54-56］

李毕松,金民东,朱祥,代林呈,杨毅. 2023. 川东北地区灯四段储层成岩作用及孔隙演化. 地学前缘,30(6)：32-44.［Li B S，Jin M D，Zhu X，Dai L C，Yang Y. 2023. Reservoir diagenesis and porosity evolution of the 4th member of the Dengying Formation in northeastern Sichuan Basin. Earth Science Frontiers，30(6)：32-44］

李伟,余华琪，邓鸿斌. 2012. 四川盆地中南部寒武系地层划分对比与沉积演化特征. 石油勘探与开发，39(6)：681-690.［Li W，Yu H Q，Deng H B. 2012. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central-southern Sichuan Basin. Petroleum Exploration and Development，39(6)：681-690］

梁金同,周刚,曾云贤,和源,朱华,罗冰,谢忱,刘四兵,李笑天,张浩,文华国. 2023. 基于自然伽马能谱测井资料的碳酸盐岩层序地层划分及其对古环境恢复的指示意义：以川东北 LT1 井下寒武统龙王庙组为例. 地质论评,69(2)：448-460.［Liang J T，Zhou G，Zeng Y X，He Y，Zhu H，Luo B，Xie C，Liu S B，Li X T，Zhang H，Wen H G. 2023. Sequence stratigraphy interpretation and implications for paleoenvironment reconstruction based on gamma-ray spectrum logging data of carbonates：a case study from the Lower Cambrian Longwangmiao Formation of the Well LT1 in northeast Sichuan Basin. Geological Review，69(2)：448-460］

林潼,谭聪,王铜山,李秋芬,冯明友,黄世伟,董景海. 2022. 川中地区龙王庙组油气差异聚集演化特征及其对气藏形成的影响. 石油实验地质,44(4)：655-665.［Lin T,Tan C,Wang T S,Li Q F，Feng M Y，Huang S W，Dong J H. 2022. Differential hydrocarbon accumulation and its influence on the formation of gas reservoirs in the Longwangmiao Formation，central Sichuan Basin. Petroleum Geology & Experiment，44(4)：655-665］

林雪梅,袁海锋,朱联强,曾伟,徐云强. 2020. 川中安岳构造寒武系龙王庙组油气成藏史. 地质学报,94(3)：916-930.［Lin X M，Yuan H F，Zhu L Q，Zeng W，Xu Y Q. 2020. Hydrocarbon accumulation history of the Cambrian Longwangmiao Formation in the Anyue structure of the central Sichuan basin. Acta Geologica Sinica，94(3)：916-930］

刘大卫,蔡春芳,扈永杰,姜磊,彭燕燕,于瑞,覃勤. 2020. 深层白云岩多期白云石化及其对孔隙演化的影响：以川中地区下寒武统

龙王庙组为例. 中国矿业大学学报,49(6)：1150-1165.［Liu D W,Cai C F,Hu Y J,Jiang L,Peng Y Y,Yu R,Qin Q. 2020. Multi-stage dolomitization process of deep burial dolostones and its influence on pore evolution：a case study of Longwangmiao Formation in the Lower Cambrian of central Sichuan Basin. Journal of China University of Mining & Technology, 49(6)：1150-1165］

刘大卫,蔡春芳,扈永杰,姜磊,王石,彭燕燕,李映涛,李汉敖. 2023. 基于共生金属硫化物硫同位素分馏程度约束热液活动温度：以川中下寒武统龙王庙组为例. 古地理学报,25(1)：215-225.［Liu D W, Cai C F, Hu Y J, Jiang L, Wang S, Peng Y Y, Li Y T, Li H A. 2023. Hydrothermal activity temperature constrained by fractionation degree of sulfur isotope in symbiotic metal sulfide：a case study of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in central Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(1)：215-225］

刘大卫. 2021. 川中地区下寒武统龙王庙组在层序格架内白云石化、成岩流体差异及其对储层的改造. 中国科学院大学博士学位论文：23-89.［Liu D W. 2021. Dolomitization, changing diagenetic fluids and their influences to dolomite reservoirs within sequeneces in Longwangmiao Formation, central Sichuan Basin. Doctoral dissertation of University of Chinese Academy of Sciences：23-89］

彭程飞. 2021.川中地区寒武系龙王庙组台内滩沉积特征研究. 长江大学硕士学位论文, 12-54.［Peng C F. 2021. Sedimentary characteristics of the inner platform shoal of Cambrian Longwangmiao Formation in Hechuan Tongnan block, central Sichuan. Masteral dissertation of Yangtze University, 12-54］

钱一雄,武恒志,周凌方,董少峰,王琼仙,宋晓波,邓美洲,李勇. 2023. 深埋条件下微生物碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化：以四川盆地西部中三叠统雷口坡组为例. 石油与天然气地质,44(1)：55-74.［Qian Y X, Wu H Z, Zhou L F, Dong S F, Wang Q X, Song X B, Deng M Z, Li Y. 2023. Diagenesis and porosity evolution of microbial carbonate rocks undergone a deep burial history：taking the Leikoupo Formation of Middle Triassic in western Sichuan Basin as an example. Oil & Gas Geology, 44(1)：55-74］

屈海洲,陈润,徐伟,张云峰,张亚,何溥为,唐松,李文皓. 2025. 白云石胶结物特征及其对深层白云岩孔隙的作用. 吉林大学学报(地球科学版),55(2)：401-416.［Qu H Z, Chen R, Xu W, Zhang Y F, Zhang Y, He P W, Tang S, Li W H. 2024. Characteristics of dolomite cement and its effects on pores in deep dolomite reservoirs. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 55(2)：401-416］

田艳红,刘树根,赵异华,宋金民,宋林珂,孙玮,梁锋,张长俊,李俊良,尹柯惟,王晨霞,吴娟,林彤,白志强,彭瀚霖,陈会芝. 2014. 四川盆地中部龙王庙组储层成岩作用. 成都理工大学学报(自然科学版),41(6)：671-683.［Tian Y H, Liu S G, Zhao Y H, Song J M, Song L K, Sun W, Liang F, Zhang C J, Li J L, Yin K W, Wang C X, Wu J, Lin T, Bai Z Q, Peng H L, Chen H Z. 2014. Diagenesis of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in central area of Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 41(6)：671-683］

王峴,胡明毅,高达,邢梦妍,汪涛,刘泠杉,王静怡. 2017. 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. 海相油气地质,22(1)：47-54.［Wang D, Hu M Y, Gao D, Xing M Y, Wang T, Liu L S, Wang J Y. 2017. Development and evolution of inner-platform shoal with control on the reservoir in a sequence framework of Lower Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 22(1)：47-54］

王东,王海军,王莹,张小青. 2022. 川西南井研地区龙王庙组储层特征及主控因素. 断块油气田, 29(1)：14-19.［Wang D, Wang H J, Wang Y, Zhang X Q. 2022. Reservoirs characteristics and main controlling factors of Longwangmiao Formation in Jingyan area, southwestern Sichuan Basin. Fault-Block Oil & Gas Field, 29(1)：14-19］

王强. 2022. 四川盆地寒武系龙王庙组储层特征及主控因素研究. 西南石油大学博士学位论文：54-87.［Wang Q. 2022. Research on reservoir characteristics and main controlling factors of Longwangmiao Formation of Cambrian in Sichuan Basin. Doctoral dissertation of Southwest Petroleum University：54-87］

谢武仁. 2019. 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. 成都理工大学博士学位论文：13-37.［Xie W R. 2019. Study on reservoir type classification & main controlling factors of reservoirs in Longwangmiao Formation and reservoir distribution prediction in central Sichuan Basin. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology：13-37］

邢凤存,刘子琪,钱红杉,李勇,周刚,张亚,黄茂轩,李成龙,龙虹宇. 2024. 川中蓬莱气区龙王庙组储层特征及其与磨溪—高石梯地区对比. 石油实验地质,46(3)：510-521.［Xing F C, Liu Z Q, Qian H S, Li Y, Zhou G, Zhang Y, Huang M X, Li C L, Long H Y. 2024. Characteristics of Longwangmiao reservoirs in Penglai gas area and comparison with those in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin. Petroleum Geology & Experiment, 46(3)：510-521］

姚根顺,周进高,邹伟宏,张建勇,潘立银,郝毅,王芳,谷明峰,董庸,郑剑锋,倪超,辛勇光. 2013. 四川盆地下寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律. 海相油气地质,18(4)：1-8.［Yao G S, Zhou J G,Zou W H,Zhang J Y,Pan L Y,Hao Y, Wang F, Gu M F, Dong Y, Zheng J F, Ni C, Xin Y G. 2013. Characteristics and distribution rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beach in Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 18(4)：1-8］

张建勇,罗文军,周进高,王勇,唐松,罗冰,潘立银,倪超,谷明峰,李文正. 2015. 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. 天然气地球科学,26(11)：2063-2074.［Zhang J Y, Luo W J, Zhou J G, Wang Y, Tang S, Luo B, Pan L Y, Ni C, Gu M F, Li W Z. 2015. Main origins of high quality reservoir of lower Cambrian Longwangmiao Formation in the giant Anyue gas field, Sichuan Basin, SW China. Natural Gas Geoscience, 26(11)：2063-2074］

张涛,宋世骏,周国晓,高建文,靖文强,马腾飞. 2022. 川中龙王庙组气藏多期充注特征及对寒武纪早期海相烃源岩发育的指示意

义. 地质论评,68(4): 1544-1554. [Zhang T, Song S J, Zhou G X, Gao J W, Jing W Q, Ma T F. 2022. Multi-stage charging characteristics of Longwangmiao Formation gas reservoir in central Sichuan and its implications for the development of marine source rocks in Early Cambrian. Geological Review, 68(4): 1544-1554]

赵玉茹. 2023.川中地区龙王庙组沉积演化及其对有利储层的控制. 长江大学硕士学位论文: 9-25. [Zhao Y R. 2023. Sedimentary evolution of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in central Sichuan and its control on reservoir development. Masteral dissertation of Yangtze University: 9-25]

周进高,徐春春,姚根顺,杨光,张建勇,郝毅,王芳,潘立银,谷明峰,李文正. 2015. 四川盆地下寒武统龙王庙组储集层形成与演化. 石油勘探与开发,42(2): 158-166. [Zhou J G,Xu C C,Yao G S,Yang G,Zhang J Y, Hao Y, Wang F, Pan L Y, Gu M F, Li W Z. 2015. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 42(2): 158-166]

朱筱敏. 2023. 层序地层学. 山东青岛: 中国石油大学出版社, 48-58. [Zhu X M. 2023. Sequence Stratigraphy. Qingdao, Shandong: China University of Petroleum Press, 48-58]

Jiang H C, Liang J T, Azmy K, Cao Z X, Wen, Zhou G, He Y, Liu S B, Huo F, Wen H G. 2023a. Controls of sedimentary facies and sealevel fluctuation on dolomitization: the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 157: 106465.

Jiang L, Hu A P, Ou Y L, Liu D W, Hu Y J, Tang Y J, Sun P, Liu Y Y, Wang Z C, Cai C F. 2023b. Diagenetic evolution and effects on reservoir development of the Dengying and Longwangmiao Formations, Central Sichuan Basin, southwestern China. Petroleum Science, 20(6): 3379-3393.

Li K R, Yang D, Song J M, Li Z W, Jin X, Liu F, Yang X, Liu S G, Ye Y H, Fan J P, Ren J X, Zhao L L, Xia S, Chen W. 2024. Dolomitization in the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in northeastern Yunnan: insights from a simulation study. Earth Science Frontiers, 31(2): 313-326

Vail P R, Audemard F, Bowman S A, Eisner P N, Perezcruz C. 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustacy and sedimentology: an overview. In: Eisele G, Rieken W, Seilacher A(eds). Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin: Springer, 617-659.

van Wagoner J C,Mitchum R M, Campion K M, Rahmanian V D. 1991. Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts for High-resolution Correlation of Time and Fades. AAPG methods in Exploration Series. No.7. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.

Yang L L, Chen D H, Hu J, Meng X J, Liu J L, Yang W. 2024.Understanding the role of sequence stratigraphy and diagenesis on the temporal and spatial distribution of carbonate reservoir quality: a conceptual modeling approach. Marine and Petroleum Geology, 147: 106010.

Zhao W Z, Zeng H L, Xu Z H, Hu S Y, Fu Q L. 2024. Seismic sedimentology of a broad, low-relief carbonate platform: the Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin, China. AAPG Bulletin, 108(3): 547-575.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)