

川中高石梯地区中二叠统栖霞组不同岩性的孔隙演化差异

屈海洲^{1,2,3}, 陈泓宇^{1,2}, 徐伟⁴, 徐会林⁴, 张兴宇^{1,2}, 汪周华⁵

1.西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2.中国石油碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学分室, 成都 610500

3.北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

4.中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610095

5.西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500

摘要 【目的】川中地区中二叠统栖霞组滩相白云岩储层显示出巨大的油气勘探潜力, 但对成岩序列、孔隙演化系统性地探讨相对薄弱。【方法】综合岩心、薄片、阴极发光观察以及图像识别等技术, 研究了栖霞组的岩石学特征及孔隙成因, 明确了各岩性之间成岩作用差异及相应的孔隙演化。【结果】高石梯地区栖霞组有泥晶灰岩、泥晶颗粒灰岩、亮晶颗粒灰岩和残余颗粒白云岩四种岩类, 发育粒间溶孔、粒内溶孔、裂缝和孔洞等孔隙类型, 有效孔隙主要发育在残余颗粒白云岩中, 以粒间溶孔为主。各岩类经历的成岩作用有差异: 溶蚀作用在不同岩性中的类型及强弱不同, 两类颗粒灰岩主要受大气淡水溶蚀, 残余颗粒白云岩云化前受更强大气淡水溶蚀, 并在此基础上发生准同生期白云石化与埋藏期溶蚀; 重结晶作用在残余颗粒白云岩中有体现; 压实—压溶作用在泥晶颗粒灰岩中更明显。各岩类中影响孔隙发育的关键成岩作用及阶段不同: 两类颗粒灰岩主要在准同生阶段形成孔隙, 后在埋藏期被压实—压溶、胶结作用部分破坏, 准同生期的溶蚀作用和白云石化是残余颗粒白云岩形成、保存孔隙的关键, 而埋藏期溶蚀作用和构造破裂作用为有力补充, 浅埋藏期胶结作用破坏孔隙。【结论】成岩作用的差异造成孔隙演化的差异, 形成现今孔隙发育程度依次降低的四种岩性: 残余颗粒白云岩 (面孔率 2.10%)、亮晶颗粒灰岩 (面孔率 1.24%)、泥晶颗粒灰岩 (面孔率 0.41%)、泥晶灰岩 (致密)。

关键词 孔隙演化; 成岩作用; 中二叠统; 栖霞组; 川中高石梯地区

第一作者简介 屈海洲, 男, 1987年出生, 博士, 副教授, 沉积学、石油与天然气地质学, E-mail: quhaizhou@swpu.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

我国深层碳酸盐岩是油气勘探开发的重要领域^[1], 储集层通常受沉积环境、成岩作用、断裂及热液活动等多因素叠加控制发育^[2-5], 同一层系不同岩性的成储潜力差异较大。四川盆地川中地区中二叠统栖霞组具有埋深大、工业气流高、岩性及孔隙多样、储层薄及成因复杂等特征^[6]。例如, 川中地区 GS001-X45、GS18 等井均在栖霞组分别获得 161.91×10^4

收稿日期: 2024-07-09; **收修改稿日期**: 2024-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41702163, 42272181); 中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目 (2020CX010301) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41702163, 42272181; Science and Technology Cooperation Project of the CNPC-SWPU Innovation Alliance, No. 2020CX010301]

m^3/d 、 $41.74 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,且储层埋深在4 000 m以上,厚度5~20 m,岩性以颗粒白云岩、晶粒白云岩、砂屑灰岩和灰质云岩等为主^[7-8]。针对栖霞组这种深层薄碳酸盐岩储层的成因,前人进行了大量研究,主要观点为储层受沉积微相及几种关键成岩作用控制^[6-15]。无论后期受何种成岩改造,多数研究认为微古地貌高地颗粒滩相沉积的颗粒灰岩为储层形成提供了物质基础,储集空间主要为溶蚀作用形成,川中地区以高频海平面变化控制的同生—准同生溶蚀作用为主,埋藏期热液流体等的溶蚀作用为次要补充^[6,7,9-14]。根据前人对白云石化作用的研究,栖霞组可能存在多期白云石化作用,包括同生—准同生期白云石化作用^[6,11-12]、埋藏期白云石化作用^[7-8,10,14-15]及构造热液白云石化作用^[13],尽管确切的白云石化时期和模式尚无统一观点,但多数研究表明云化流体与沉积期海水相关,且白云石化作用不直接形成储集空间,而是继承保存储集空间的关键作用^[6-9,11-12,14]。此外,差异胶结作用、重结晶作用及压实—压溶作用等其余成岩作用均在不同方面参与了栖霞组白云岩储层的形成过程^[6-15]。不同岩性成储潜力的区别归根到底是成岩作用及孔隙演化的差异,从以往的研究看来,众多学者对各类成岩作用及对孔隙演化的控制存在不同观点,且对成岩序列、孔隙演化系统性地探讨相对薄弱。因此本文以钻井岩心、薄片资料为基础,结合阴极发光分析、图像识别技术,开展栖霞组不同岩性的孔隙特征对比研究,分析不同岩性之间的成岩作用差异,进而重建孔隙演化过程,旨在探讨深层碳酸盐岩薄储层的孔隙成储机制。

1 地质背景

高石梯地区位于四川盆地中部潼南—安岳一带,区域构造位置隶属川中平缓构造带。中二叠世四川盆地处于稳定沉降期^[6],发生广泛海侵,沉积了由海陆交互相含煤碎屑岩到海相碳酸盐岩地层,依次为梁山组、栖霞组^[17]。研究区栖霞组内部自下而上可划分为栖霞一段、栖霞二段,栖霞一段沉积水体较深,以泥晶灰岩为主,部分地区底部发育硅质灰岩和硅质条带^[18],栖霞二段主要为厚层状生屑灰岩、砂屑灰岩和颗粒白云岩(图1)。研究区内栖霞组与下伏梁山组及上覆茅口组间均为整合接触。栖霞组沉积期四川盆地主要为开阔台地环境,受川中古隆起的地貌特征及海平面升降共同控制,发育台内颗粒滩、灰坪等沉积亚相^[19](图2)。

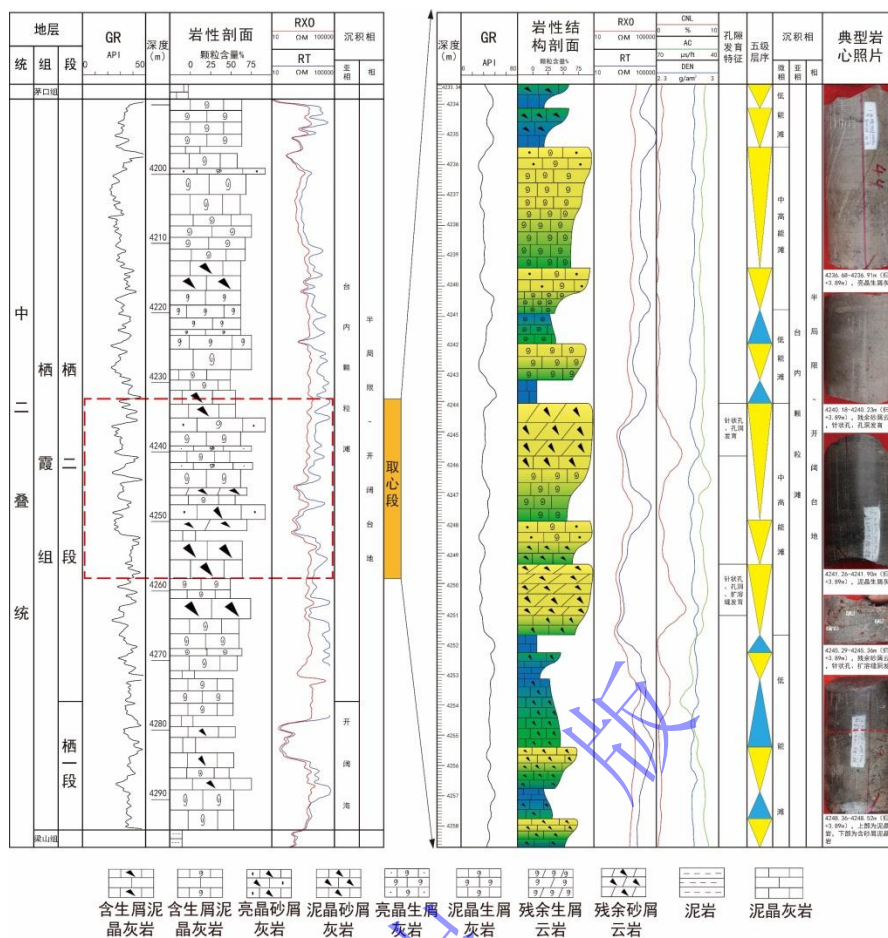


图 1 GS009-H5 单井综合柱状图及取心段特征

Fig.1 Comprehensive stratigraphic column of Qixia Formation at well GS009-H5

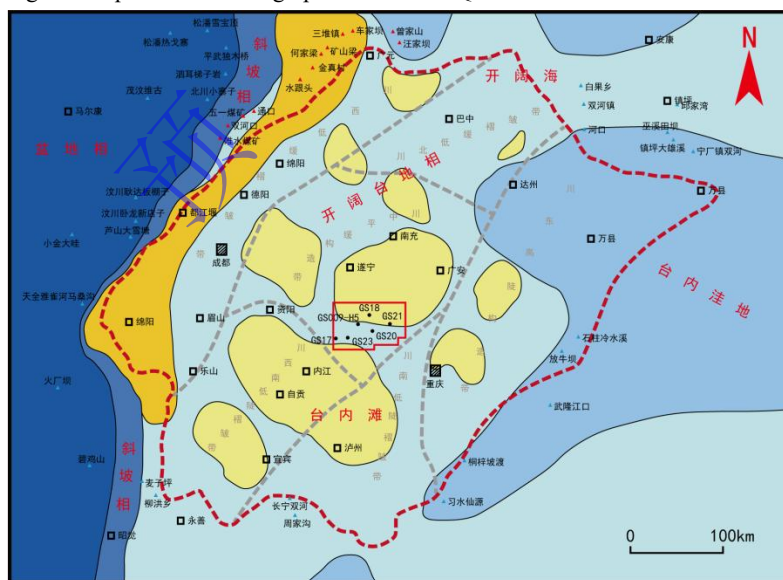


图 例



图 2 四川盆地中二叠统栖霞组沉积相平面图 (据文献[17]修改)

Fig.2 Sedimentary facies map of the Middle Permian Qixia Formation, Sichuan Basin (modified from reference[17])

2 岩石类型

依据岩心、铸体薄片观察鉴定,依据冯增昭的石灰岩分类方案^[20],川中高石梯地区栖霞组岩石类型包括泥晶灰岩(灰泥含量>50%、颗粒含量<50%)、泥晶颗粒灰岩(灰泥含量<50%,颗粒含量>50%)、亮晶颗粒灰岩(亮晶胶结物含量<50%、颗粒含量>50%)和残余颗粒白云岩四类,颗粒类型主要为生屑和砂屑。

2.1 泥晶灰岩

泥晶灰岩是指泥晶含量超过50%的岩石类型,包括纯泥晶灰岩(颗粒含量<15%)、含颗粒泥晶灰岩(颗粒含量15%~25%)、颗粒质泥晶灰岩(颗粒含量25%~50%)。颗粒含量少于15%的纯泥晶灰岩是栖霞一段的主要岩性,而在栖霞二段少见。宏观上呈深灰色,见裂缝被方解石全充填(图3a)。镜下仅识别出少量(<15%)生物碎屑,呈漂浮状分散在灰泥基质中(图3d)。栖霞二段这类岩石整体颗粒含量比栖霞一段高,几乎都为含颗粒泥晶灰岩或颗粒质泥晶灰岩,颗粒以生屑为主,砂屑其次(图3b)。由于该类岩性呈现出致密、孔隙不发育的特点,因而不作为孔隙演化的研究对象。

2.2 泥晶颗粒灰岩

该岩性是研究区内栖霞组发育厚度最大的一类,在各亚段内均可见,颗粒含量大于50%,颜色为深灰色—灰色、薄—厚层均有发育,包括泥晶生物(屑)灰岩、泥晶砂屑灰岩,部分粒间及粒内发育少量亮晶胶结物(图3d)。镜下颗粒间为点接触关系,部分受压实—压溶作用影响强烈,使颗粒压实变形并发育大量缝合线。

2.3 亮晶颗粒灰岩

这类岩石集中发育在栖霞二段中部,颗粒含量大于50%,岩心上呈灰—浅灰色,中—厚层状产出,包括亮晶砂屑灰岩、亮晶生物(屑)灰岩、亮晶砂屑生屑灰岩(图2e)。镜下颗粒呈漂浮状,颗粒间主要发育亮晶胶结物,也可见一定量的灰泥,形成泥~亮晶颗粒灰岩(图3f)。

2.4 残余颗粒白云岩

该类白云岩是区内栖霞组储层的主要岩性,与亮晶颗粒灰岩同样集中发育在栖霞二段中部,宏观上呈现浅灰—灰白色,见溶蚀孔洞及裂缝发育(图3g)。镜下见残余颗粒幻影,内部结构被交代破坏程度较高,原始颗粒边缘也不清晰,与周缘的白云石胶结物形成“雾心亮边”结构,晶体呈细—中晶、自形—半自形(图3h),阴极发光下二者具相似的暗红色弱发光特征,可见明显边界(图3i)。部分样品重结晶程度较低,保留了较完整的原始颗

粒形态，边缘清晰可见（图 3l），另一部分重结晶程度较高，呈细一中晶他形粒状晶体，原始颗粒结构破坏程度高，仅见残余颗粒幻影（图 3j），阴极发光下相比“雾心亮边”白云岩具有更强的红色阴极发光特征（图 3k）。

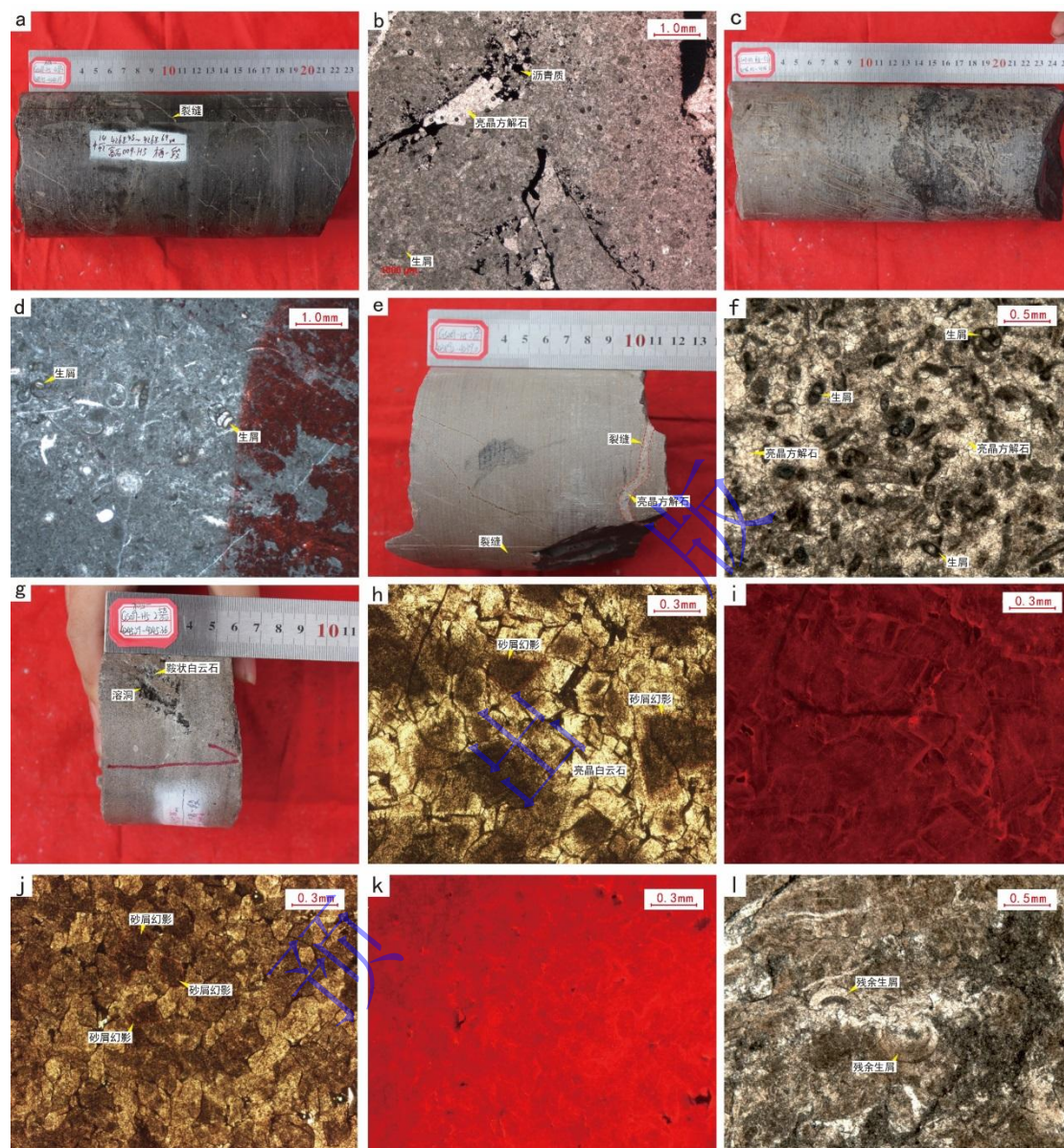


图 3 栖霞组岩石类型及特征（GS009-H5 井）

(a) 深灰色泥晶灰岩，可见裂缝被方解石充填，4 262.69~4 268.45 m；(b) 含生屑泥晶灰岩，4 242.59 m，单偏光；(c) 灰色泥晶生屑灰岩，4 246.02~4 246.28 m；(d) 泥晶生屑灰岩，4 246.28 m，单偏光，茜素红染色；(e) 浅灰色亮晶生屑灰岩，见一条高角度裂缝、一条低角度裂缝发育，4 238.92~4 239.00 m；(f) 亮晶生屑灰岩，4 238.94 m，单偏光；(g) 浅灰色残余砂屑白云岩，见溶洞发育并被白云石、沥青质半充填，4 245.29~4 245.36 m；(h) 残余砂屑白云岩，4 245.23 m，单偏光；(i) 为 h 的阴极发光特征；(j) 残余砂屑白云岩，4 240.18 m，单偏光；(k) 为 j 的阴极发光特征；(l) 残余生屑白云岩，可见生屑残余结构，4 244.68 m，单偏光

Fig.3 Rock types and characteristics of Qixia Formation (well GS009-H5)

3 孔隙特征

依据岩心和铸体薄片观察, 川中高石梯区块栖霞组孔隙类型包括粒间溶孔、粒内溶孔, 其他类型的孔隙包括裂缝和孔洞 (>2 mm)。通过对取自 GS009-H5 井岩心的 74 张铸体薄片使用 ImageJ 图像软件进行孔径、面孔率等参数的获取, 其中残余颗粒白云岩 18 张, 亮晶颗粒灰岩 17 张, 泥晶颗粒灰岩 39 张, 发现所有类型的岩石中残余颗粒白云岩的面孔率最高, 且主要类型为粒间溶孔 (图 4)。

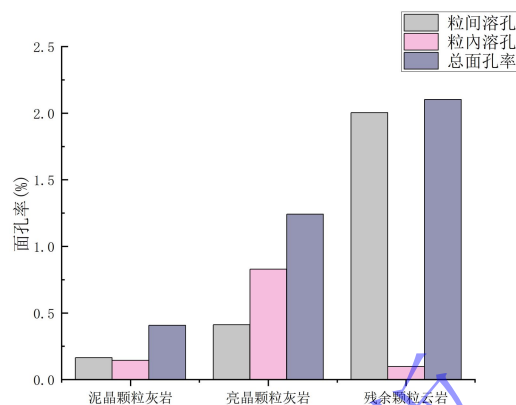


图 4 栖霞组各岩性总面孔率及两类孔隙的平均面孔率柱状图

Fig.4 Histogram of total plane porosity of each lithology and average plane porosity of two types of pores in Qixia Formation

3.1 粒间溶孔

粒间溶孔为粒间孔溶蚀扩大形成, 可见胶结物全充填或半充填 (图 5a~c), 有效的粒间溶孔主要发育在残余颗粒白云岩中, 孔径介于 0.02~0.76 mm, 大部分介于 0.1~0.3 mm, 部分边缘呈不规则锯齿状, 是研究区内栖霞组主要的储集空间, 其面孔率介于 0.17%~4.45%。两类颗粒灰岩中也局部发育粒间溶孔, 孔径介于 0.01~0.67 mm, 方解石胶结物全充填或半充填 (图 6f, k)。

3.2 粒内溶孔

粒内溶孔是颗粒完全溶蚀或内部选择性溶蚀形成的孔隙, 其中完全溶蚀的又称为铸模孔 (图 5d, e)。粒内溶孔相比粒间溶孔发育较少, 且演化过程中多被胶结物等充填, 保留部分所提供的有效孔隙空间也远不如粒间溶孔。粒内溶孔在各类岩性中均可见, 未被充填的粒内溶孔主要见于残余颗粒白云岩中 (图 5f)。两类颗粒灰岩中常见铸模孔发育, 充填物包括沥青质和嵌晶状方解石胶结物 (图 5d、图 6d, k), 孔径介于 0.01~0.16 mm, 面孔率介于 0~1.44%。

3.3 裂缝

区内栖霞组主要发育一定构造背景下产生的构造裂缝, 各类岩性中均可被识别 (图 3a, e、图 5g、图 6h, l), 薄片下缝宽介于 0.03~1.35 mm, 常切穿整个薄片, 多被方解石、白

云石等全充填或半充填（图 5g），部分宏观上可识别出后期成岩流体对早期裂缝扩大溶蚀的迹象。

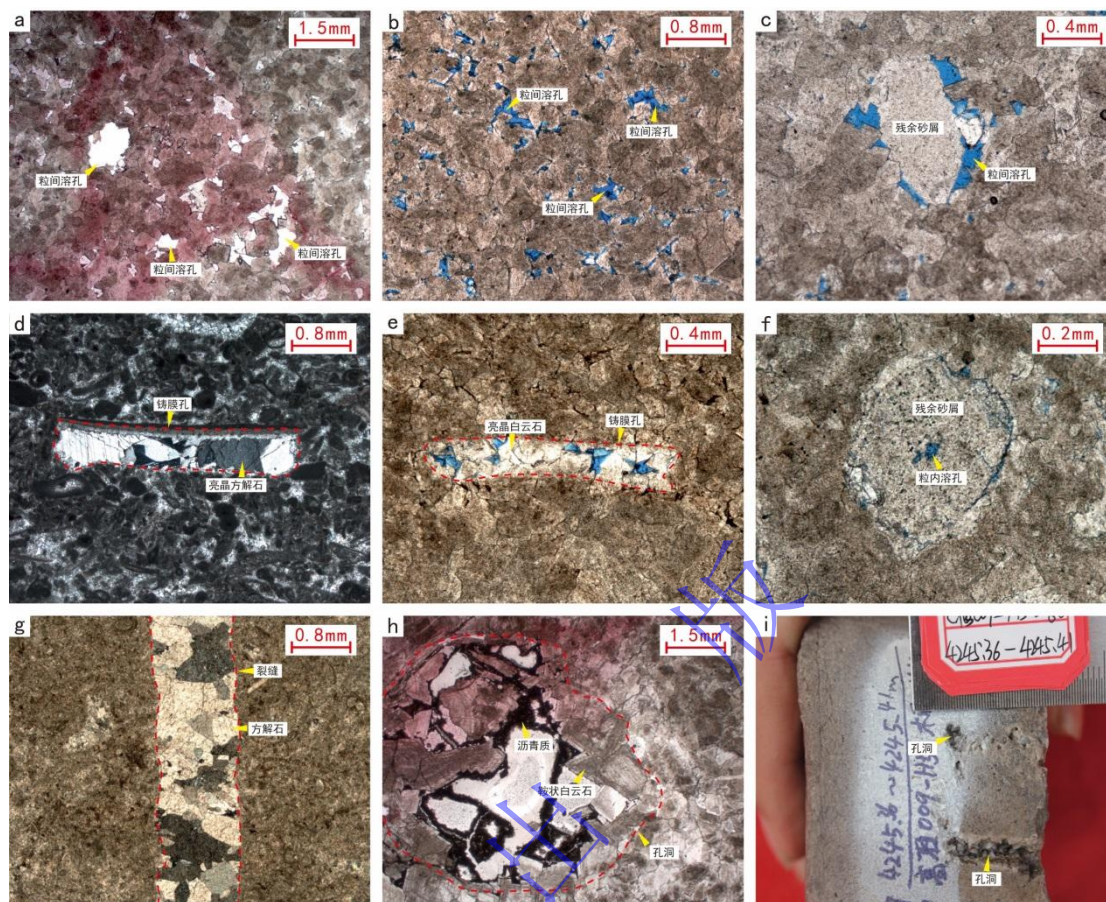


图 5 孔隙类型及特征（GS009-H5 井）

(a) 残余砂屑白云岩，粒间溶孔发育，4 240.18 m，单偏光，茜素红染色；(b) 残余砂屑白云岩，粒间溶孔发育，4 240.34 m，单偏光；(c) 残余砂屑白云岩，粒间溶孔发育，4 245.46 m，单偏光；(d) 泥—亮晶砂屑灰岩，铸模孔被亮晶方解石充填，4 242.78 m，单偏光；(e) 残余砂屑白云岩，铸模孔被白云石半充填，4 245.36 m，单偏光；(f) 残余砂屑白云岩，见粒内溶孔发育，4 245.46 m，单偏光；(g) 生屑泥晶灰岩，构造裂缝被方解石充填，4 252.59 m，正交光；(h) 残余砂屑白云岩，溶蚀孔洞发育，边缘充填鞍状白云石，4 245.23 m，单偏光，茜素红染色；(i) 浅灰色残余砂屑白云岩，溶蚀孔洞发育，4 245.36~4 245.41 m

Fig.5 Types and characteristics of pore spaces(well GS009-H5)

3.4 孔洞

孔洞一般指溶蚀作用产生的直径大于 2 mm 的孔隙空间类型。研究区内部分孔洞与裂缝伴生，呈串珠状分布（图 7b, c），另一部分呈孤立发育（图 5i），主要见于白云岩中，孔径介于 2.00~5.00 mm，内部常见被白云石以及沥青质全充填或半充填（图 3d、图 5i）。

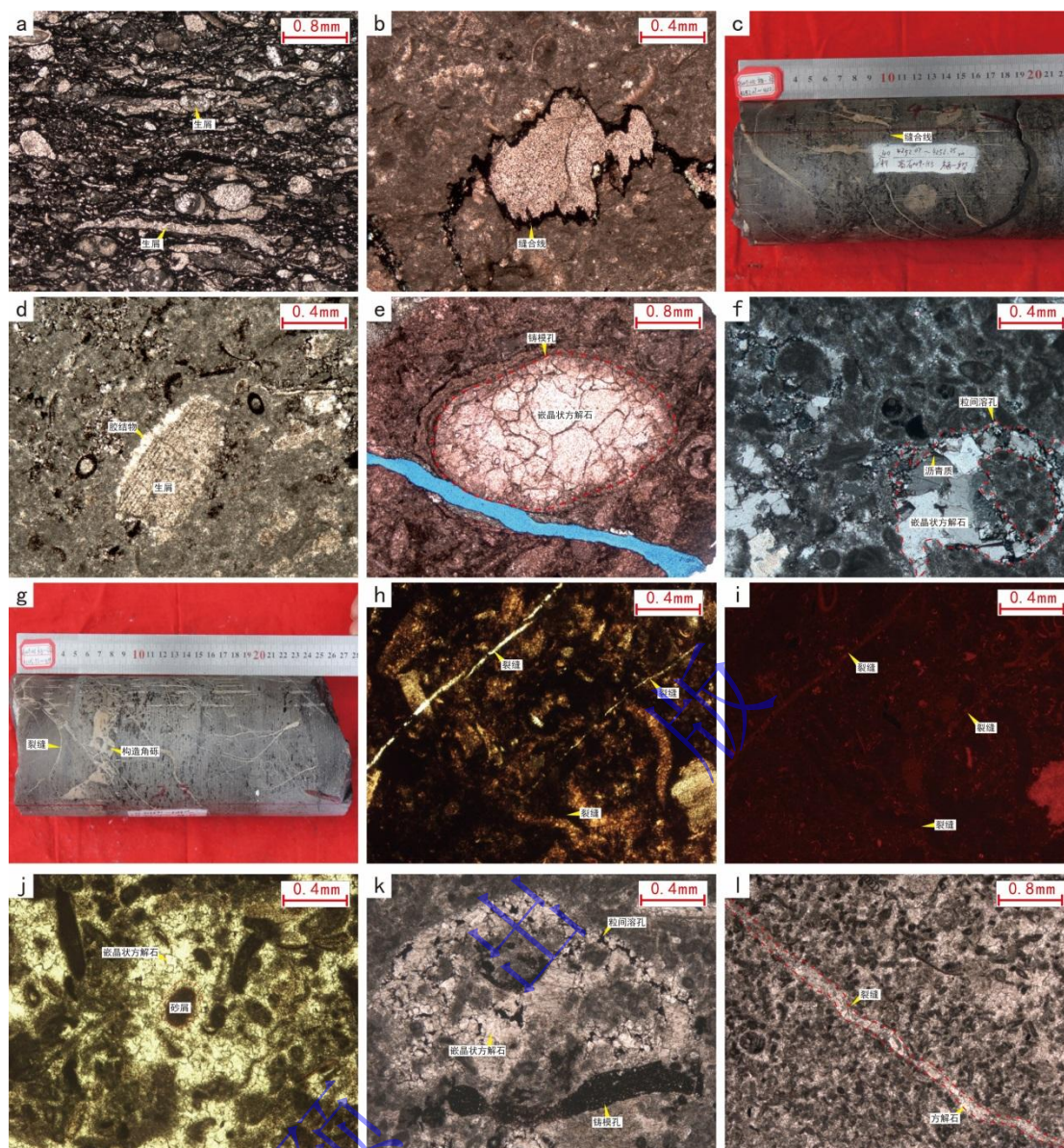


图 6 泥晶颗粒灰岩和亮晶颗粒灰岩成岩作用特征 (GS009-H5 井)

(a) 泥晶生屑灰岩, 颗粒压实变形呈长条状定向排列, 4 250.98 m, 单偏光; (b) 含生屑泥晶灰岩, 缝合线沿颗粒边缘发育, 4 241.16 m, 单偏光; (c) 深灰色泥晶生屑灰岩, 缝合线发育, 4 252.07~4 252.25 m; (d) 含生屑砂屑泥晶灰岩, 生屑边缘发育悬垂状胶结物, 4 231.61 m, 单偏光; (e) 泥晶生屑灰岩, 铸模孔中充填嵌晶状方解石胶结物, 4 271.61 m, 单偏光; (f) 亮一泥晶砂屑灰岩, 粒间溶孔中发育嵌晶状方解石胶结物, 其残余空间中充填沥青质, 4 242.78 m, 正交光; (g) 灰色泥晶砂屑灰岩, 构造裂缝相互切割及构造角砾发育, 其中充填方解石, 4 248.92~4 249.20 m; (h) 泥晶生屑灰岩, 4 250.03 m, 单偏光; (i) 为 h 的阴极发光特征; (j) 亮晶砂屑灰岩, 颗粒间充填方解石胶结物, 4 241.90 m, 单偏光; (k) 亮晶砂屑灰岩, 见大气淡水溶蚀形成的溶孔发育, 被沥青质及方解石充填, 4 233.86 m, 单偏光; (l) 亮晶生屑灰岩, 裂缝被方解石充填, 4 238.94 m, 单偏光

Fig.6 Diagenetic characteristics of micrite grain limestone and sparite grain limestone(well GS009-H5)

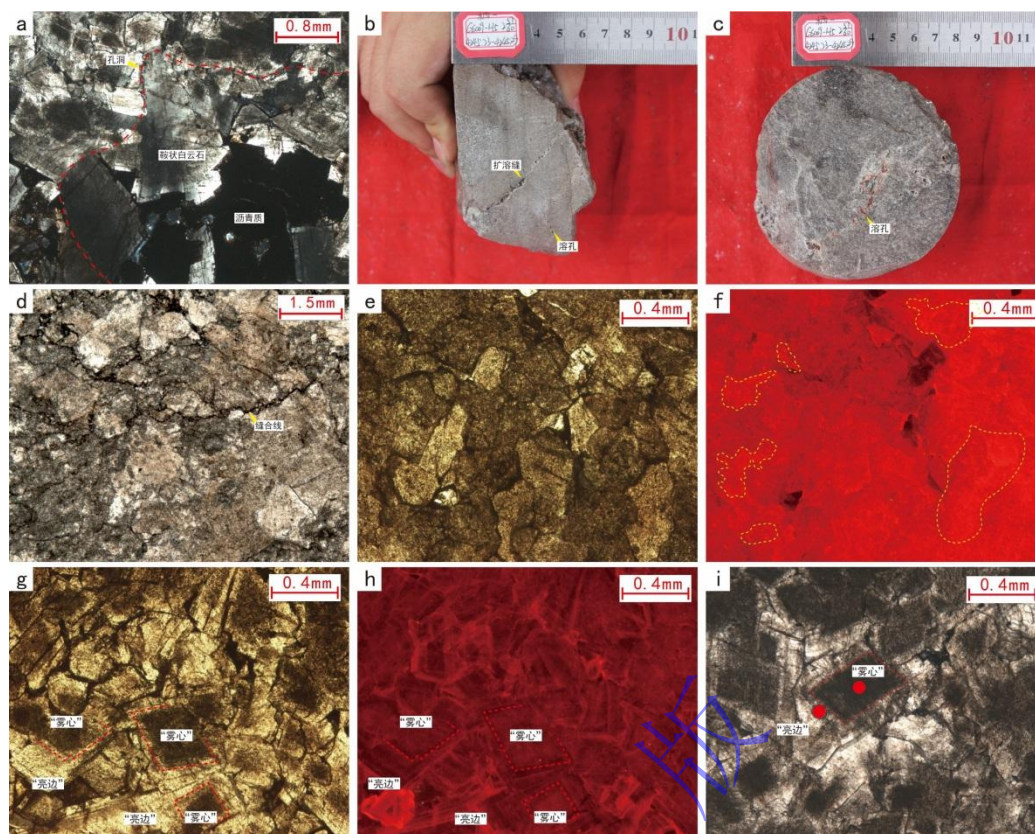


图 7 残余颗粒白云岩成岩作用特征

(a) 残余砂屑白云岩，溶蚀空洞边缘充填鞍状白云石胶结物，内部充填沥青质，4 245.23 m，正交光；(b) 浅灰色残余砂屑白云岩，扩溶缝及溶孔发育，4 245.23~4 245.29 m，岩心照片；(c) b 中岩心的另一视角，见溶孔沿裂缝呈串珠状发育；(d) 残余砂屑白云岩，缝合线发育，4 244.79 m，单偏光；(e) 残余砂屑白云岩，重结晶后白云石晶体呈半圆形—他形，4 240.18 m，单偏光；(f) 为 e 的阴极发光特征，图中标记为不规则亮斑较明显的区域；(g) 残余砂屑白云岩，4 245.23 m，GS009-H5 井，单偏光；(h) 为 g 的阴极发光特征；(i) 残余砂屑白云岩，红点标注为稀土测试点位，4 245.23 m，GS009-H5 井，单偏光

Fig.7 Diagenetic characteristics of residual grain dolostone

4 孔隙成因

4.1 沉积微相

区内栖霞组孔隙空间最发育的残余颗粒白云岩，通过残余结构及前人的研究可知原岩主要为滩相颗粒灰岩，具有明显的层控性和相控性特征^[21]。根据前人提出的观点，研究区内栖霞组主要为开阔台地沉积环境，栖二段沉积期间水体相对局限、氧化程度较高^[19]，识别出的岩石类型中泥晶灰岩主要形成于滩间微相，两类颗粒灰岩及残余颗粒白云岩均形成于颗粒滩亚相，其中亮晶颗粒灰岩、残余颗粒白云岩形成于颗粒滩中地貌高，水体能量高的部位^[22]。薄片观察结果表明，高能颗粒滩环境中沉积的亮晶颗粒灰岩及残余颗粒白云岩，相比低能环境中沉积的泥晶颗粒灰岩孔隙更加发育（图 4）。高能颗粒滩环境下的沉积物本身具有相对高的原生孔隙度，有利于栖霞组沉积至今经历的一系列成岩、构造作用改造。而在低能环境中沉积的泥晶颗粒灰岩及泥晶灰岩，原生孔隙多被灰泥充填，孔隙不发育，

也不利于接受后期成岩、构造作用改造。因此, 同生期台内高能颗粒滩相中的亮晶颗粒灰岩, 保留了较高原始孔隙度, 是此后接受成岩改造, 岩石孔隙空间发育的物质基础。

4.2 成岩作用及差异成岩演化序列

成岩作用主要控制碳酸盐岩次生孔隙的发育^[23], 本文结合岩心、铸体薄片、阴极发光等观察, 着重对两类颗粒灰岩及残余颗粒白云岩所受的成岩作用影响进行研究, 并讨论不同岩性经历成岩作用的差异性。为突出成岩作用差异性, 避免赘述, 不同岩类中特征相似的成岩作用均在第一次合并论述。

4.2.1 泥晶颗粒灰岩

泥晶颗粒灰岩中识别出的成岩作用类型有: 泥晶化作用、压实—压溶作用、溶蚀作用、胶结作用及构造破裂作用。

1) 泥晶化作用

泥晶化作用是藻类或菌类对颗粒钻孔之后孔隙被泥晶方解石充填的作用^[24], 在泥晶颗粒灰岩和亮晶颗粒灰岩中最为明显, 颗粒的泥晶化作用有两种表现形式: 一是泥晶方解石对整个颗粒发生置换, 二是颗粒的边缘泥晶化, 形成“泥晶套”, 颗粒内部结构仍保存完好(图 6f, d)。

2) 压实—压溶作用

在泥晶颗粒灰岩中, 压实作用导致了岩石组构物理上的变化, 因受上覆沉积物压实作用, 生屑颗粒表现出定向排列并产生塑性变形(图 6a), 通常发生在浅一中埋藏阶段, 常伴随大量原始孔隙水排出, 岩石孔隙空间大幅减少; 而与此相反, 亮晶颗粒灰岩粒间胶结物含量高, 残余颗粒云岩发生白云石化作用, 受压实作用影响小。压溶作用在泥晶颗粒灰岩中体现为大量缝合线呈锯齿状切割生屑边缘(图 6b), 同样具有定向发育特征, 其排列方向与生屑颗粒排列方向具有一致性, 内部充填不溶物及沥青质(图 6a), 宏观岩心上亦可见明显缝合线(图 6c), 显示出后期压溶作用十分强烈, 残余颗粒云岩中亦可见缝合线发育。压溶作用浅一中埋藏环境即可产生, 且可延续至深埋藏环境, 并表现得更为强烈^[25]。

3) 溶蚀作用

溶蚀作用可发生在碳酸盐岩的多个成岩阶段, 泥晶颗粒灰岩中主要识别出准同生大气淡水溶蚀作用, 大气淡水针对文石质或高镁方解石质等不稳定矿物构成的生物碎屑进行组构选择性溶蚀, 形成铸模孔及粒内溶孔(图 5d、图 6e), 铸模孔常被认为是大气淡水溶蚀作用的标志, 同时也发生非组构选择性的溶蚀作用^[25-26], 形成部分溶孔, 其孔径明显大于颗粒粒径, 内部充填沥青及方解石胶结物(图 6f, k)。

4) 胶结作用

胶结物的成分与结晶形态很大程度上反映沉积环境特征^[27]。泥晶颗粒灰岩形成于低能环境，粒间充填灰泥，因此胶结作用主要在此后的演化中体现，识别出两类胶结物：大气淡水环境下形成的悬垂状胶结物，呈弧形弯曲状（图 6d），与埋藏环境下形成的嵌晶状方解石胶结物，充填在铸模孔（图 5d、图 6e）、粒间溶孔（图 6f）及裂缝（图 5g、图 6h，1）内，可见两组节理及双晶发育（图 5g）。

5) 构造破裂作用

各岩类中均可见构造破裂现象，岩心上可见大量构造裂缝及构造角砾发育（图 5h），几乎都被方解石充填，裂缝间相互切割现象常见（图 5h）。阴极发光下可识别出至少两期次走向有差异的裂缝（图 5i，j），其内部充填物具弱阴极发光特征（图 5k，1）。残余颗粒云岩中的构造裂缝，为同期热液流体运移提供通道，有助于溶蚀作用发生，由此形成扩溶缝溶蚀孔洞，其内部充填鞍状白云石。根据前人对川中地区走滑断裂系统的研究成果，中二叠世后主要的构造—断裂活动时期为晚二叠世—早三叠世，可能与晚二叠世峨眉地裂运动有关，以及中侏罗世至今，与燕山期—喜马拉雅期构造运动有关^[28]。由此推测研究区内构造破裂可能主要形成于这两个阶段。

4.2.2 亮晶颗粒灰岩

该岩石类型中识别出的成岩作用类型包括：泥晶化作用、溶蚀作用、胶结作用及构造破裂作用。泥晶化作用、构造破裂作用特征与泥晶颗粒灰岩类似，不再赘述。

1) 溶蚀作用

亮晶颗粒灰岩受到的溶蚀作用在类型上与泥晶颗粒灰岩相同，均为大气淡水溶蚀作用，既可见组构选择性溶蚀，形成铸模孔，也可见非组构选择性溶蚀，形成粒间溶孔（图 6k），根据薄片观察和面孔率识别，亮晶颗粒灰岩所受溶蚀作用强于泥晶颗粒灰岩。

2) 胶结作用

亮晶颗粒灰岩形成于高能环境，粒间胶结物的含量较高。同生成岩阶段海水首先在颗粒边缘沉淀了第一期叶片状环边胶结物（图 6j），厚度介于 0.01~0.03 mm（图 3f、图 6j）。此后沉淀了嵌晶状方解石胶结物，主要充填在铸模孔及大气淡水改造形成的粒间溶孔内（图 6k）。

4.2.3 残余颗粒云岩

该岩类中识别出的成岩作用类型包括：白云石化作用、压溶作用、溶蚀作用、胶结作用、重结晶作用及构造破裂作用。压溶作用、构造破裂作用特征与泥晶颗粒灰岩类似，不

再赘述。

1) 白云石化作用

白云石化作用增强岩石抗压性, 有利于保存大气淡水溶蚀形成的储集空间, 研究区白云石化作用以准同生期白云石化和浅埋藏期白云石化为主。

根据薄片观察, 研究区内栖霞组白云岩具残余颗粒幻影及“雾心亮边”结构(图 3h, j, l、图 7g, i), 以往的研究认为该结构是多期白云石化的产物, “雾心”为早期流体交代前驱矿物形成, “亮边”则为后期流体沉淀形成^[29-31]。在阴极发光显微镜下, “雾心”和“亮边”均具有微弱的暗红色阴极发光(图 3h, i、图 7g, h)。前人的研究表明碳酸盐的阴极发光性受 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 相对含量的控制, Mn^{2+} 为发光性的激活剂, Fe^{2+} 为猝灭剂, 而碳酸盐沉积流体(主要是海水)通常具有比成岩流体更低的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 含量, 因此海水环境下形成的组分往往缺乏发光激活剂而表现出很弱的阴极发光^[32]。杨文杰等^[6]通过测定研究区白云岩样品的 C、O、Sr 同位素, $\delta^{13}C$ 与 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值大体落于中二叠世海水范围内, 部分样品 $\delta^{18}O$ 值轻微负偏, 总体反映栖霞组白云岩为早期海源流体交代形成。为进一步讨论, 本文通过激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)对白云石晶体“雾心”及“亮边”部位分别进行原位稀土元素分析, 数据采用澳大利亚后太古宙页岩(PAAS)进行标准化。“雾心”的稀土配分模式与同期灰岩相似, 均表现为重稀土相对轻稀土富集, Y 显著正异常(图 8), 表明“雾心”形成于准同生期海源流体交代。

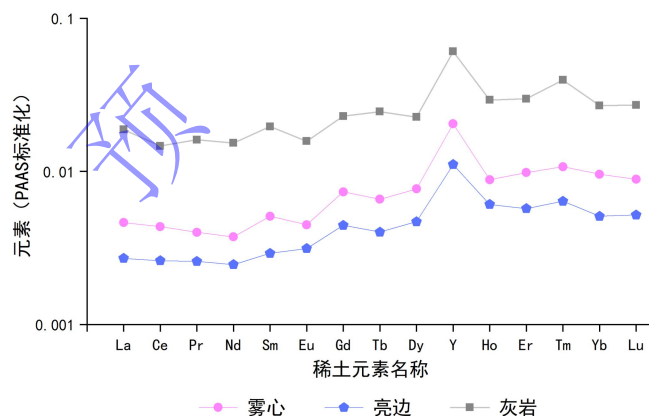


图 8 “雾心”及“亮边”的 REE 配分特征(灰岩数据引自文献[33])

Fig.8 REE partitioning characteristics of "cloudy center" and "bright rim" (limestone data from reference[33])

浅埋藏期白云石化主要体现为白云石晶体“亮边”胶结物的沉淀, 在阴极发光下, “雾心”和“亮边”具有明显界线, 形成环带状特征, 且具有近乎一致的阴极发光特征(图 3h, i、图 7g, i), “亮边”的稀土配分模式与“雾心”和同期灰岩同样非常相近(图 8), 也表明“雾心”为海源流体沉淀。前人研究认为总稀土含量与流体盐度相关^[34-35], “亮边”的总稀土含量相比“雾心”更低(图 8), 因而“亮边”沉淀时流体盐度相对较低, 当盐度较低

时白云石结晶缓慢，结晶程度更好，所以较明亮^[36]。根据薄片观察结果，“亮边”形成早于热液沉淀鞍状白云石，根据前人对川中栖霞组鞍状白云石胶结物的 U-Pb 同位素测年结果，其形成年龄为 $262.7 \pm 7.5 \text{ Ma}$ ^[11]，大致对应茅口组沉积期，此时栖霞组处于浅埋藏阶段，综上所述认为“亮边”胶结物是栖霞组进入浅埋藏阶段后，由流体盐度降低的晶间残余海水沉淀。

2) 溶蚀作用

残余颗粒白云岩中可识别出两个阶段的溶蚀作用，第一阶段与两类颗粒灰岩相似，为准同生期大气淡水溶蚀作用，形成铸模孔（图 5e）及粒间溶孔（图 5b, c），这些孔隙空间可为云化流体提供优势通道，并且从现今面孔率的情况来看，白云岩在云化前受到的大气淡水溶蚀作用可能是更强的。第二阶段为埋藏期溶蚀作用，埋藏期流体对此前已经形成的溶孔或后期形成的构造裂缝进一步扩大溶蚀，形成岩心上沿裂缝发育的串珠状溶孔（图 7c）、孤立溶蚀孔洞（图 5i）及扩溶构造裂缝（图 7b）。根据薄片下各岩石组分间的关系，判断栖霞组在埋藏阶段经历了两期溶蚀作用：第一期发生在构造热液沉淀鞍状白云石之前，使此前形成的孔隙扩大（图 5h、7a），溶蚀流体可能为构造热液，第二期溶蚀发生在沥青充注之前，使孔隙边缘呈锯齿状并使部分粒间溶孔扩大（图 7a）。

3) 胶结作用

残余颗粒云岩中识别出的胶结物均为白云石，包括亮晶白云石胶结物，表现为充填铸模孔（图 5e）及早期保存的孔隙，以及“雾心亮边”白云石的“亮边”部分（图 3h、图 7g, i）。还有鞍状白云石胶结物，通常认为与热液流体活动有关^[37]，镜下可见波状消光特征及弯曲晶面，全充填或半充填在埋藏期溶蚀形成的溶孔以及构造裂缝中，晶体一般较粗大，大小介于 0.25~1.50 mm（图 5h、图 7a），结合前人研究结果，与该期胶结物有关的热液活动发生于茅口末期峨眉山玄武岩喷发时期^[11]。

4) 重结晶作用

白云石重结晶作用的结构证据包括晶体尺寸增大、非平面晶体界面数量增加等^[38]。残余颗粒白云岩的部分样品在薄片下可观察到大量非平面晶体边界，部分边界在单偏光下几乎消失（图 3j、图 7d, e）。白云石的非平面晶体边界形成温度通常高于 $50 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[39]，且根据前人做出的总结，白云石重结晶后具有均匀一半均匀发光、无暗发光区域、晶体内存在不规则状的几微米至几十微米的较亮发光斑块等阴极发光特征^[38,40]。该类白云岩同时具备上述薄片观察及阴极发光特征（图 7e, f），因此推测细一中晶半自形—他形白云石经历了埋藏阶段重结晶作用。由于重结晶过程会导致扩散系数大于 1 的微量元素含量整体增

加，如 Fe 和 Mn^[38]，而 Fe 和 Mn 的含量在碳酸盐岩中本身具有正相关性，且 Fe 作为阴极发光的猝灭剂相较于 Mn 作为激活剂而言的作用是有限的^[32]，因此研究区内重结晶作用形成的他形粒状白云岩比具自形一半自形晶体的“雾心亮边”白云岩具有更强的发光性（图 3i, k、图 7f, h）。重结晶作用虽不能直接形成新的孔隙空间，但可以改变微观孔隙结构使孔隙喉道连通性变好，消除部分无效孔隙，提升储集物性^[38]。

4.2.4 成岩作用差异性

综上所述，在成岩演化中栖霞组各岩类经历的成岩作用类型相似，但具体表现和作用程度有差异（图 9）。胶结作用以亮晶颗粒灰岩和残余颗粒白云岩最发育，泥晶颗粒灰岩较弱发育。溶蚀作用在不同岩类中发育类型及强弱不同，两类颗粒灰岩主要受大气淡水溶蚀作用，且由于古地貌的差异，亮晶颗粒灰岩受溶蚀的程度高于泥晶颗粒灰岩，现今面孔率也是亮晶颗粒灰岩较高（图 4）；残余颗粒白云岩在受到更强的大气淡水溶蚀作用的基础上发生准同生期白云石化，使孔隙得到良好保存，进而成为发生埋藏溶蚀作用的基础，现今面孔率为最高（图 4）。压实—压溶作用在受胶结作用较弱并缺乏白云石化作用的泥晶颗粒灰岩中体现最为明显。此外，泥晶化作用在残余颗粒白云岩中已不可见，仅在两类颗粒灰岩中可见。重结晶作用仅在残余颗粒白云岩中有所体现。

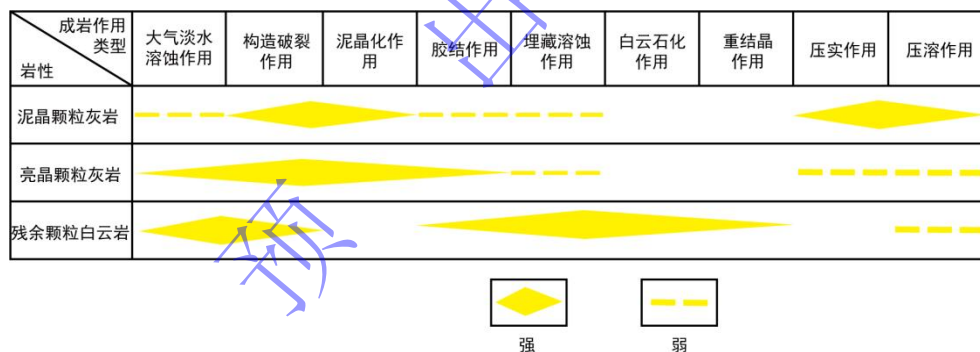


图 9 研究区栖霞组各岩类成岩作用发育情况

Fig.9 Diagenetic development in the study area of each rock type in the Qixia Formation

4.2.5 成岩序列

按照中华人民共和国石油天然气行业碳酸盐岩成岩阶段划分标准对成岩阶段进行划分^[41]。根据上述栖霞组各岩性中识别出的成岩作用类型，将研究区中二叠统栖霞组的成岩阶段划分为：同生—准同生成岩阶段、早成岩阶段、中—晚成岩阶段，其中同生—准同生成岩阶段对应海水及大气淡水环境，早成岩阶段对应浅埋藏环境，中—晚成岩阶段对应中—深埋藏环境。结合埋藏史（图 10）及构造活动背景，划分栖霞组各岩性成岩序列如下（图 11）。

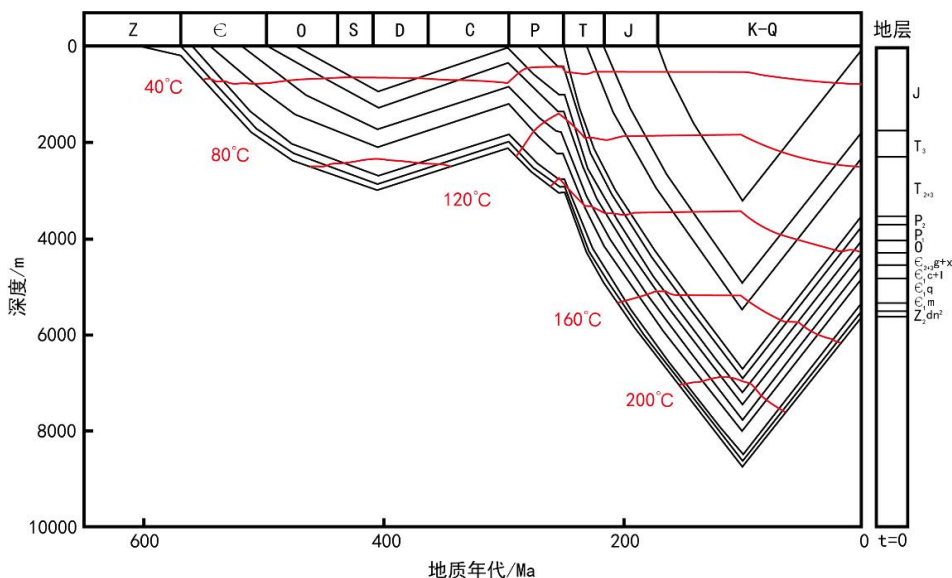


图 10 川中 GS17 井埋藏史图 (据文献[42]修改)

Fig.10 Burial history at well GS17 in central Sichuan (modified from reference[42])

岩性	地质时期	P ₂		P ₃	T	J~Q
	成岩阶段	同生-准同生阶段	早成岩阶段		中-晚成岩阶段	
泥晶颗粒灰岩	泥晶化作用	[Diagrammatic representation of diagenetic evolution]				
	胶结作用	悬垂状胶结物	[Diagrammatic representation]			
		嵌晶状方解石	[Diagrammatic representation]			
	压实-压溶作用	[Diagrammatic representation]				
	大气淡水溶蚀作用	[Diagrammatic representation]				
构造破裂作用	[Diagrammatic representation]					
亮晶颗粒灰岩	泥晶化作用	[Diagrammatic representation]				
	大气淡水溶蚀作用	[Diagrammatic representation]				
	胶结作用	环边胶结物	[Diagrammatic representation]			
		嵌晶状方解石	[Diagrammatic representation]			
构造破裂作用	[Diagrammatic representation]					
残余颗粒白云岩	白云石化作用	[Diagrammatic representation]				
	大气淡水溶蚀作用	[Diagrammatic representation]				
	埋藏溶蚀作用	[Diagrammatic representation]				
	胶结作用	亮晶白云石	[Diagrammatic representation]			
		鞍状白云石	[Diagrammatic representation]			
	重结晶作用	[Diagrammatic representation]				
	压溶作用	[Diagrammatic representation]				
构造破裂作用	[Diagrammatic representation]					

图 11 高石梯地区中二叠统栖霞组不同岩性的差异成岩演化序列

Fig.11 Differential diagenetic evolution sequence of different lithologies in Middle Permian Qixia Formation in Gaoshiti area

5 孔隙演化模式

综上所述, 研究区栖霞组孔隙发育主要受到沉积相带、成岩作用的控制。颗粒滩相是栖霞组岩石孔隙发育的物质基础; 成岩作用中两期溶蚀作用、白云石化作用、重结晶作用及构造破裂作用对孔隙发育起建设性作用, 胶结作用、压实—压溶作用起破坏性作用。

5.1 泥晶颗粒灰岩

在同生期海水环境下, 低能颗粒滩相中沉积了泥晶颗粒灰岩, 颗粒间充填灰泥, 此时沉积物还未经压实, 灰泥间尚存一定的原生孔隙^[43]。此后海平面下降, 沉积物暴露地表接受大气淡水环境改造, 同时发生组构选择性溶蚀作用形成铸模孔(图 5d), 以及非组构选择性溶蚀作用形成粒间溶孔(图 6f), 还形成了少量悬垂状胶结物(图 6d)。之后进入浅埋藏环境的过程中, 孔隙主要受压实—压溶作用、胶结作用及构造破裂作用影响, 压实作用使灰泥间的原生孔隙几乎消失, 压溶作用形成大量缝合线(图 6a~c), 胶结作用形成嵌晶状方解石充填铸模孔及粒间溶孔(图 6e, f)。结合构造背景, 栖霞组在浅埋藏阶段受峨眉地幔柱活动影响^[44], 形成了一系列构造裂缝(图 6g~i)。在中—深埋藏环境下, 孔隙受压溶作用和进一步胶结作用影响, 孔隙空间减少。此外, 结合薄片观察以及前人在该区块的研究成果, 栖霞组在侏罗纪存在一期有机质大规模成熟运移^[45], 形成的沥青质主要充填在铸模孔及残余粒间溶孔中(图 6d, f)。

5.2 亮晶颗粒灰岩

同生成岩阶段的海水环境下, 高能颗粒滩相沉积的亮晶颗粒灰岩具有较高的原始孔隙度^[32], 但受海水胶结作用影响, 几乎所有原生粒内孔均被胶结物完全充填, 并形成围绕颗粒边缘的第一期叶片状方解石胶结物, 充填原生粒间孔(图 3f、图 6j)。此后海平面下降, 亮晶颗粒灰岩沉积于微地貌高地, 比泥晶颗粒灰岩更易优先暴露在大气淡水环境下, 受到更大程度地大气淡水溶蚀改造。在大气淡水环境之后进入浅埋藏环境的过程中, 对孔隙发育影响最大的是胶结作用, 使此前大气淡水溶蚀形成的粒间溶孔、铸膜孔大部分被嵌晶状方解石充填(图 6k)。中—深埋藏环境的演化过程则与泥晶颗粒灰岩类似(图 12)。

5.3 残余颗粒云岩

残余颗粒云岩是研究区内亮晶颗粒灰岩在大气淡水溶蚀的基础上, 由准同生期浓缩海水白云石化作用形成, 白云石化作用增加了岩石整体强度, 使得压实作用在残余颗粒云岩中并未有所体现, 从而更好地在后期演化中保存孔隙空间。从发生准同生期白云石化后进入浅埋藏环境的过程中, 粒间残余的富镁流体沉淀亮晶白云石胶结物, 形成“亮边”充填

粒间溶孔（图 3h、图 7g, i）及铸模孔（图 5e）。该时期峨眉地幔柱活动^[1]，形成构造裂缝并伴随热液活动，在溶蚀作用形成的扩溶缝及孔洞中沉淀鞍状白云石胶结物（图 5h、图 7a），总体使孔隙空间有所增加。此后进入中—深埋藏环境，在压溶作用的影响下发育了少量缝合线（图 7d），重结晶作用使部分样品中的白云石呈现他形粒状（图 3j、图 7d, e）。侏罗纪时期有机质通过受第二期埋藏溶蚀作用后的孔隙空间运移，在其中半充填沥青质（图 5h、图 7a），最终成为现今所见栖霞组岩石结构及孔隙发育特征（图 12）。

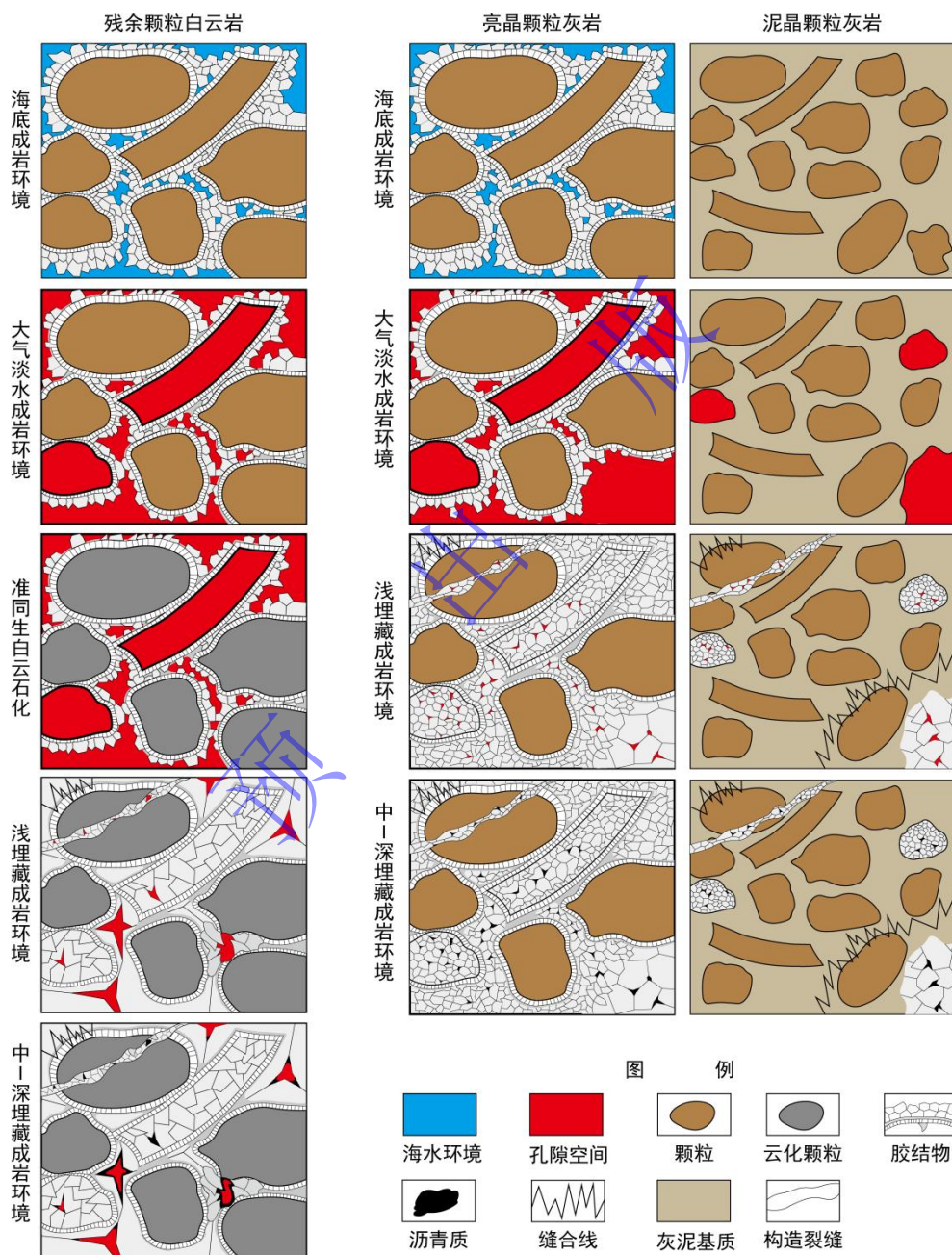


图 12 川中高石梯地区中二叠统栖霞组不同岩性的孔隙演化模式图

Fig.12 Pore evolution model of different lithologies in the Middle Permian Qixia Formation in Gaoshiti area, central Sichuan

6 结论

(1) 川中高石梯地区中二叠统栖霞组发育泥晶灰岩、泥晶颗粒灰岩、亮晶颗粒灰岩及残余颗粒白云岩。孔隙类型包括粒间溶孔、粒内溶孔、裂缝及孔洞。有效的孔隙空间主要分布在残余颗粒白云岩中,孔径介于 0.02~0.76 mm,以粒间溶孔为主,面孔率介于 0.17%~4.45%。

(2) 栖霞组经历的溶蚀作用、胶结作用、压实—压溶作用、白云石化作用及重结晶作用等有差异。溶蚀作用在不同岩性中的类型及强弱不同,两类颗粒灰岩受大气淡水溶蚀,残余颗粒白云岩在更强的大气淡水溶蚀基础上发生白云石化,进而受到埋藏期流体溶蚀;重结晶作用在残余颗粒白云岩中更加明显;压实—压溶作用则在弱胶结作用且缺乏白云石化作用的泥晶颗粒灰岩中最为明显。

(3) 各岩类中影响各类孔隙发育的关键成岩作用及阶段不同:两类颗粒灰岩中常见的铸模孔和粒间溶孔主要为准同生期大气淡水溶蚀形成,并在埋藏期受胶结作用、压实—压溶作用破坏,残余颗粒白云岩中最发育的粒间溶孔、孔洞则是在准同生大气淡水溶蚀基础上,由准同生白云石化作用保存,经埋藏期溶蚀作用、构造破裂作用改善,但受到浅埋藏期胶结作用破坏。最终形成现今孔隙发育程度依次降低的四种岩性:残余颗粒白云岩、亮晶颗粒灰岩、泥晶颗粒灰岩、泥晶灰岩。

致谢 感谢诸位审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References)

- [1] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156-1166. [Zhang Guangya, Ma Feng, Liang Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.]
- [2] 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 1-13. [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Huili, et al. New insights into the Formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 1-13.]
- [3] 樊太亮, 高志前, 吴俊. 塔里木盆地深层碳酸盐岩建造—改造作用与多类型储层有序性分布[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 1-18. [Fan Tailiang, Gao Zhiqian, Wu Jun. Formation and modification of deep-burial carbonate rocks and orderly distribution of multi-type reservoirs in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 1-18.]
- [4] 张春林, 姚泾利, 李程善, 等. 鄂尔多斯盆地深层寒武系碳酸盐岩储层特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 604-614. [Zhang Chunlin, Yao Jingli, Li Chengshan, et al. Characteristics of deep Cambrian carbonate reservoirs in the Ordos Basin and main control factors[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 604-614.]
- [5] 洪海涛, 杨雨, 刘鑫, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 64-73. [Hong Haitao, Yang Yu, Liu Xin, et al. The characteristics and development law of marine carbonate reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl.2): 64-73.]

- [6] 杨文杰, 谭秀成, 李明隆, 等. 四川盆地威远—高石梯地区中二叠统栖霞组台内薄层白云岩发育特征与成因[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 75-90. [Yang Wenjie, Tan Xiucheng, Li Minglong, et al. Development characteristics and genesis of thin layered dolomite of the Middle Permian Qixia Formation in the platform in Weiyuan-Gaoshiti area, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 75-90.]
- [7] 韩心奕, 伏美燕, 邓虎成, 等. 低频次叠加的同生溶蚀作用对滩相储层发育的控制: 以川中栖霞组为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 239-244, 255. [Han Xinyi, Fu Meiyang, Deng Hucheng, et al. The control of syngenetic dissolution of low-frequency superposition on the development of shoal facies reservoir: A case study of Qixia Formation in central Sichuan[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(2): 239-244, 255.]
- [8] 何溥为, 胥旺, 张连进, 等. 川中磨溪—高石梯地区栖霞组白云岩特征及成因机制[J]. 沉积学报, 2021, 39(6): 1532-1545. [He Puwei, Xu Wang, Zhang Lianjin, et al. Characteristics and genetic mechanism of Qixia Formation dolomite in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(6): 1532-1545.]
- [9] 朱茂, 黄世伟, 宋叙, 等. 四川盆地潼南—合川区块中二叠统白云岩储层形成主控因素与勘探区带预测[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 149-161. [Zhu Mao, Huang Shiwei, Song Xu, et al. Main controlling factors of the Middle Permian dolomite reservoir and prediction of exploration zone in Tongnan-Hechuan block, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 149-161.]
- [10] 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, 36(1): 101-109. [Jiang Zhibin, Wang Xingzhi, Zeng Deming, et al. Constructive diagenesis and porosity evolution in the Lower Permian Qixia Formation of Northwest Sichuan[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 101-109.]
- [11] 段军茂, 郑剑锋, 沈安江, 等. 川中地区下二叠统栖霞组白云岩储层特征和成因[J]. 海相油气地质, 2021, 26(4): 345-356. [Duan Junmao, Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoir of the Lower Permian Qixia Formation in central Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(4): 345-356.]
- [12] 郝毅, 谷明峰, 韦东晓, 等. 四川盆地二叠系栖霞组沉积特征及储层分布规律[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 193-201. [Hao Yi, Gu Mingfeng, Wei Dongxiao, et al. Sedimentary characteristics and reservoir distribution of the Permian Qixia Formation in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(3): 193-201.]
- [13] 芦飞凡, 谭秀成, 王利超, 等. 川中地区中二叠统栖霞组滩控岩溶型白云岩储层特征及主控因素[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 456-469. [Lu Feifan, Tan Xiucheng, Wang Lichao, et al. Characteristics and controlling factors of dolomite reservoirs within shoal-controlled karst in the Middle Permian Qixia Formation, central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(2): 456-469.]
- [14] 胡安平, 潘立银, 郝毅, 等. 四川盆地二叠系栖霞组、茅口组白云岩储层特征、成因和分布[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 39-52. [Hu Anping, Pan Liyin, Hao Yi, et al. Origin, characteristics and distribution of Dolostone reservoir in Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin, China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(2): 39-52.]
- [15] Xiao D, Zhang B J, Tan X C, et al. Discovery of a shoal-controlled karst dolomite reservoir in the Middle Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin, Southwest China[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2018, 36(4): 686-704.
- [16] 鲁国, 何登发, 开百泽. 四川盆地构造沉降特征及成因机制分析[J]. 地质科学, 2023, 58(1): 86-104. [Lu Guo, He Dengfa, Kai Baize. Tectonic subsidence characteristics of Sichuan Basin and its enlightenment to Basin genesis[J]. Chinese Journal of Geology, 2023, 58(1): 86-104.]
- [17] 白晓亮, 杨跃明, 文龙, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组沉积相展布及勘探意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 13-24. [Bai Xiaoliang, Yang Yueming, Wen Long, et al. Sedimentary facies distribution and exploration significance of the Middle Permian Qixia Formation in the Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(5): 13-24.]
- [18] 董翼昕. 四川盆地中二叠统白云岩成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [Dong Yixin. Genetic mechanism of the Middle Permian dolomite in the Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.]

- [19] 刘慧, 陈培, 吴冬, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区栖霞组沉积模式研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6760-6774. [Liu Hui, Chen Pei, Wu Dong, et al. Sedimentary models of Qixia Formation in Gaoshiti-Moxi area of Sichuan Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6760-6774.]
- [20] 冯增昭. 碳酸盐岩分类[J]. 石油学报, 1982, 3(1): 11-18. [Feng Zengzhao. Classification of carbonate rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(1): 11-18.]
- [21] 唐思哲, 谭秀成, 李明隆, 等. 川中南部下二叠统栖霞组白云岩储层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(3): 388-401. [Tang Sizhe, Tan Xiucheng, Li Minglong, et al. Characteristics and main controlling factors of dolomite reservoirs in the Lower Permian Qixia Formation in south of central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 388-401.]
- [22] 饶诗怡, 伏美燕, 邓虎成, 等. 基于岩相和地球化学特征的沉积古地貌恢复新方法: 以川中栖霞组为例[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 205-213. [Rao Shiyi, Fu Meiyuan, Deng Hucheng, et al. A new method for restoration of sedimentary paleogeomorphology based on lithofacies and geochemistry: A case study of the Qixia Formation in central Sichuan[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 205-213.]
- [23] 王振宇, 宁科科, 屈海洲, 等. 阿克苏地区寒武系肖尔布拉克组不同白云岩的孔隙特征、成因及演化[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 256-269. [Wang Zhenyu, Ning Keke, Qu Haizhou, et al. Pore characteristics, origin, and evolution of different dolomites in the Cambrian Xiaerbulak Formation in the Aksu area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 256-269.]
- [24] El-Saiy A K, Jordan B R. Diagenetic aspects of tertiary carbonates west of the northern Oman Mountains, United Arab Emirates[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 31(1): 35-43.
- [25] 方少仙, 侯方浩. 碳酸盐岩成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 61-75. [Fang Shaoxian, Hou Fanghao. Carbonate diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 61-75.]
- [26] 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998: 289-290. [Qiang Zitong. Carbonate reservoir geology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1998: 289-290.]
- [27] 罗启超. 川北元坝地区中二叠统茅口组碳酸盐岩成岩作用及孔隙演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2021. [Luo Qichao. Diagenesis and pore evolution of Middle Permian Maokou Formation carbonate rocks in Yuanba area, northern Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.]
- [28] 管树巍, 姜华, 鲁雪松, 等. 四川盆地中部走滑断裂系统及其控油气作用[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1542-1557. [Guan Shuwei, Jiang Hua, Lu Xuesong, et al. Strike-slip fault system and its control on oil & gas accumulation in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(11): 1542-1557.]
- [29] 钟寿康, 李凌, 谭秀成, 等. 鄂尔多斯盆地中东部马五段中粗晶白云岩成因及成岩演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(6): 691-710. [Zhong Shoukang, Li Ling, Tan Xiucheng, et al. Study on the genesis and diagenesis of medium-coarse crystal dolomite of the member 5 of Majiagou Formation in the central-eastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(6): 691-710.]
- [30] Choquette P W, Hiatt E E. Shallow-burial dolomite cement: a major component of many ancient sucrosic dolomites[J]. Sedimentology, 2008, 55(2): 423-460.
- [31] 何勇, 刘波, 刘红光, 等. 塔里木盆地西北缘通古孜布隆剖面下奥陶统蓬莱坝组白云石化流体来源及白云岩成因分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(4): 781-791. [He Yong, Liu Bo, Liu Hongguang, et al. Origin of Mg-rich-fluids and Dolomitization of Lower Ordovician Penglaiba Formation at Tongguzibulong outcrop in the northwestern margin of Tarim Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(4): 781-791.]
- [32] 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2008, 33(1): 26-34. [Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, et al. Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, eastern Sichuan Basin of China[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(1): 26-34.]

- [33] 李小宁, 黄思静, 黄可可, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组白云石化海相流体的地球化学依据[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 35-45. [Li Xiaoning, Huang Sijing, Huang Keke, et al. Geochemical characteristics of Middle Permian Qixia Fm dolomitized marine fluids in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 35-45.]
- [34] 张世华, 宋晓波, 李蓉, 等. 基于 LA-ICP-MS 的微量元素分析对白云岩成岩流体性质的示踪研究: 以川西南 P1 井栖霞组白云岩为例[J]. 矿物岩石, 2022, 42(3): 89-100. [Zhang Shihua, Song Xiaobo, Li Rong, et al. Tracing study on diagenetic fluid properties based on LA-ICP-MS: A case study of Qixia Formation dolomite in well P1, Southwest Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2022, 42(3): 89-100.]
- [35] 王小林, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地中生代白云石微区 REE 配分特征及其成因研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(6): 721-733. [Wang Xiaolin, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Using *in situ* REE analysis to study the origin and diagenesis of dolomite of Lower Paleozoic, Tarim Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2009, 39(6): 721-733.]
- [36] Folk R L. The natural history of crystalline calcium carbonate: Effect of magnesium content and salinity[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1974, 44(1): 40-53.
- [37] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [38] 白璇, 钟怡江, 黄可可, 等. 白云石重结晶作用及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2022, 41(4): 804-817. [Bai Xuan, Zhong Yijiang, Huang Keke, et al. Recrystallization of dolomite and its geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2022, 41(4): 804-817.]
- [39] Huang S J, Huang K K, Lü J, et al. The relationship between dolomite textures and their formation temperature: a case study from the Permian-Triassic of the Sichuan Basin and the Lower Paleozoic of the Tarim Basin[J]. Petroleum Science, 2014, 11(1): 39-51.
- [40] Nielsen P, Swennen R, Keppens E. Multiple-step recrystallization within massive ancient dolomite units: An example from the Dinantian of Belgium[J]. Sedimentology, 1994, 41(3): 567-584.
- [41] 国家能源局. SY/T 5478—2019 碳酸盐岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019. [National Energy Administration. SY/T 5478-2019 The division of diagenetic stages in carbonate rocks[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.]
- [42] 杨程宇, 文龙, 王铁冠, 等. 川中隆起安岳气田古油藏成藏时间厘定[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 492-502. [Yang Chengyu, Wen Long, Wang Tieguan, et al. Timing of hydrocarbon accumulation for paleo-oil reservoirs in Anyue gas field in Chuanzhong Uplift[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 492-502.]
- [43] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 115-118. [Huang Sijing. Carbonate diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 115-118.]
- [44] 张廷山, 陈晓慧, 刘治成, 等. 峨眉地幔柱构造对四川盆地栖霞期沉积格局的影响[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1251-1264. [Zhang Tingshan, Chen Xiaohui, Liu Zhicheng, et al. Effect of Emeishan mantle plume over the sedimentary pattern of mid-Permian Xixia Period in Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(8): 1251-1264.]
- [45] 蒋裕强, 谷一凡, 李开鸿, 等. 四川盆地中部中二叠统热液白云岩储渗空间类型及成因[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 16-24. [Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Li Kaihong, et al. Space types and origins of hydrothermal dolomite reservoirs in the Middle Permian strata, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 16-24.]

Differences in Pore Evolution of Different Lithologies in the Middle Permian Qixia Formation, Gaoshiti Area, Central Sichuan Basin

QU HaiZhou^{1,2,3}, CHEN HongYu^{1,2}, XU Wei⁴, XU HuiLin⁴, ZHANG XingYu^{1,2}, WANG ZhouHua⁵

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Southwest Petroleum University Branch of the Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, China National Petroleum Corporation, Chengdu 610500, China

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

4. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610095, China

5. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract: [Objective] The beach facies dolomite reservoir in the Middle Permian Qixia Formation, central Sichuan Basin, has significant potential for oil and gas exploration, but relatively little systematic study has been reported on its diagenetic sequence and pore evolution. [Methods] The petrology and pore genesis of the Qixia Formation were investigated by core observation, thin section analysis, cathodoluminescence examination and image recognition techniques, to delineate diagenetic variations and pore evolution in the different lithologies. [Results] In the Gaoshiti area, four types of rock are identified in the Qixia Formation: micrite limestone, micrite grain limestone, sparite grain limestone, and residual grain dolostone. Four types of reservoir space are observed: intergranular dissolved pores, intragranular dissolved pores, fractures and vugs. Each rock type has undergone distinctive diagenesis: the type and intensity of dissolution vary in the different lithologies. The two kinds of granular limestone are mainly dissolved by meteoric water, and the residual granular dolomite is more strongly dissolved by meteoric water. On this basis, dolomitization and burial period dissolution occur. Recrystallization is more pronounced in the residual grain dolomite, whereas compaction and pressure dissolution is more evident in micrite grain limestone. The key diagenesis and stages influencing pore development vary between the different rock types: the pores in the two types of granular limestone are mainly formed by quasi-syngenetic dissolution, then partially destroyed by compaction and cementation during the burial stage. The dissolution and dolomitization in the parasyngenetic stage result in the formation and preservation of the pores of the residual granular dolomites; dissolution and tectonic fracture at the burial stage are beneficial supplements, but cementation during the shallow burial stage destroys the pores. [Conclusion] The varied diagenesis has caused different pore evolution, forming four lithologies with a decreasing extent of pore development: residual grain dolostone (plane porosity: 2.10%), sparite grain limestone (plane porosity: 1.24%), micrite grain limestone (plane porosity: 0.41%) and micrite limestone (compact).

Key words: pore evolution; diagenesis; Middle Permian; Qixia Formation; Gaoshiti area of central Sichuan