

渝西地区志留系石牛栏组 灰岩储层特征及有利储层形成机制

罗妮娜¹, 陈守春¹, 李雯雯², 李世临¹, 黎 李¹, 徐 露¹, 汪飒黎¹, 刘建平²,
黄晨霖², 彭文枬², 谭先锋²

(1. 中国石油西南油气田分公司 重庆气矿, 重庆 400707; 2. 重庆科技大学 石油与天然气工程学院, 重庆 401331)

摘要: 渝西地区志留系石牛栏组具备近源成藏的巨大潜力。根据岩心、野外露头、岩屑薄片观察、储层物性及孔隙结构分析(核磁 T_2 谱和高压压汞实验)、岩石地球化学(碳、氧同位素和微量元素)等资料, 分析石牛栏组储层孔隙类型、物性特征和成岩演化过程, 研究渝西地区石牛栏组碳酸盐岩储层特征及形成机制。结果表明: 渝西地区志留系石牛栏组灰岩储层主要岩性为亮晶生屑灰岩, 沉积于碳酸盐内缓坡礁滩体, 孔隙类型以残余生物体腔孔、粒间孔和溶蚀孔缝为主, 孔隙度为 2.00%~6.00%, 渗透率为 $(0.010\sim 6.980)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。储层经历同生、准同生、埋藏和表生 4 个成岩阶段。有利储层形成的建设性成岩作用为准同生和表生阶段两期岩溶作用, 准同生阶段岩溶作用主要发育相带为碳酸盐岩内缓坡礁滩相, 表生阶段岩溶作用对储层的改造局限于碳酸盐岩内缓坡礁滩相带亮晶生屑灰岩, 体现沉积—成岩作用对石牛栏组储层形成机制。该结果为渝西地区石牛栏组储层分布预测和碳酸盐岩气藏高效勘探开发提供依据。

关键词: 灰岩储层; 储层特征; 形成机制; 成岩演化; 准同生岩溶; 表生岩溶; 石牛栏组; 志留系; 四川盆地

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2026)01-0079-19

0 引言

全球碳酸盐岩地层保存丰富的油气资源^[1-2]。四川盆地安岳特大型气田主要为碳酸盐岩孔—洞储层, 常规天然气年产量超过 $3\times 10^6\ \text{m}^3$, 占四川盆地常规天然气总产量的 80% 以上^[3-4], 碳酸盐岩油气藏是当前和未来油气勘探开发的重要领域。碳酸盐岩储层类型多为溶洞、裂缝型, 孔隙和裂缝的发育与沉积相和溶蚀作用密切相关, 明确沉积—成岩作用对储层质量的影响至关重要^[5-8]。

下志留统石牛栏组是四川盆地碳酸盐岩勘探开发的目标层系^[9]。龙马溪组是四川盆地页岩气主力烃源岩^[10-12], 石牛栏组沉积在龙马溪组之上, 具有近源成藏的天然优势。蜀南—渝西地区的自贡、泸州等地是龙马溪组烃源岩的沉积中心^[13-16], 多口探井揭示石牛栏组具有良好的油气显示^[17-19], 渝西地区石牛栏组专层风险探井——GT1H 井测试获高产工业气流, 日产天然气 $3.1\times 10^4\ \text{m}^3$ 。人们对志留系石牛栏组的研究主要集中于沉积方面, 认为川南石牛栏组沉积于开阔台地、台地边缘礁滩、台地边缘缓坡、陆棚、局限台地等环境, 有利储层的形成主要是受沉积相控制, 其中环川中隆起及黔中隆起碳酸盐岩礁滩相是油气储层预测的重要目标^[18-19]。谭先锋等^[20]、王颀^[21]、王海军等^[22]分析黔中古隆起北斜坡石牛栏组样品, 认为石牛栏组属于特低孔、低渗储层, 局部裂缝发育, 明确石牛栏组礁滩相灰岩储层基本特征, 未探讨储层形成的控制因素和机制。新的钻井及野外剖面揭示, 环川中古隆起的渝西地区石牛栏组碳酸盐岩内缓坡礁滩相带灰岩广泛发育溶蚀孔隙和裂缝, 可能是改善储层质量的关键因素。内缓坡礁滩相带灰岩的溶蚀孔隙、裂缝与成岩过程中的岩溶作用密切相关, 沉积—成岩作用是优质储层形成的关键^[23-24]。

以渝西地区石牛栏组碳酸盐岩储层为研究对象, 基于薄片观察、常规孔渗、核磁共振、高压压汞实验, 明确石牛栏组储层基本特征; 采用微量元素、阴极发光和碳、氧同位素等方法, 分析储层成岩演化过程; 结合石牛栏组沉积相展布特征, 分析有利储层形成、沉积相和成岩演化的关系, 揭示石牛栏组有利储层的形

收稿日期: 2025-05-14; 编辑: 刘丽丽

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42072140); 重庆市杰出青年科学基金项目(CSTB2022NSCQ-JQX0031); 西南油气田重庆气矿科研协作项目(XNS 重庆矿 JS2024-277)

作者简介: 罗妮娜(1995—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事油气沉积与储层方面的研究。

通信作者: 李雯雯, E-mail: lwwnju@163.com

成机制,为渝西地区石牛栏组碳酸盐岩气藏高效勘探开发提供指导。

1 区域地质概况

四川盆地是中国超级含油气盆地之一,面积约为 $2.66 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[25]。四川盆地位于南方扬子地块,是多旋回构造运动影响的大型叠合盆地,经历古生代—中生代早期克拉通拗陷阶段和中生代中期—新生代晚期的前陆盆地阶段,形成盆地“两隆夹一坳”的构造格局,两个隆起分别代表西北部的川中古隆起、南部的黔中古隆起和雪峰山隆起,一个坳陷为川黔坳陷^[26-27],渝西地区位于四川盆地南部,包括重庆市西部和四川省东南部(见图1(a))。渝西地区早志留世继承晚奥陶世的构造格局,川中古隆起持续抬升扩展,黔中古隆起经历先抬升后下降的过程,对同时期的石牛栏组沉积具有重要的影响。受加里东晚期广西运动的影响,川中古隆起持续隆升,形成环川中古隆起分布的地貌高带,川中古隆起进一步抬升而导致石牛栏组顶部地层广泛遭受剥蚀,地层发育不全^[26-28]。

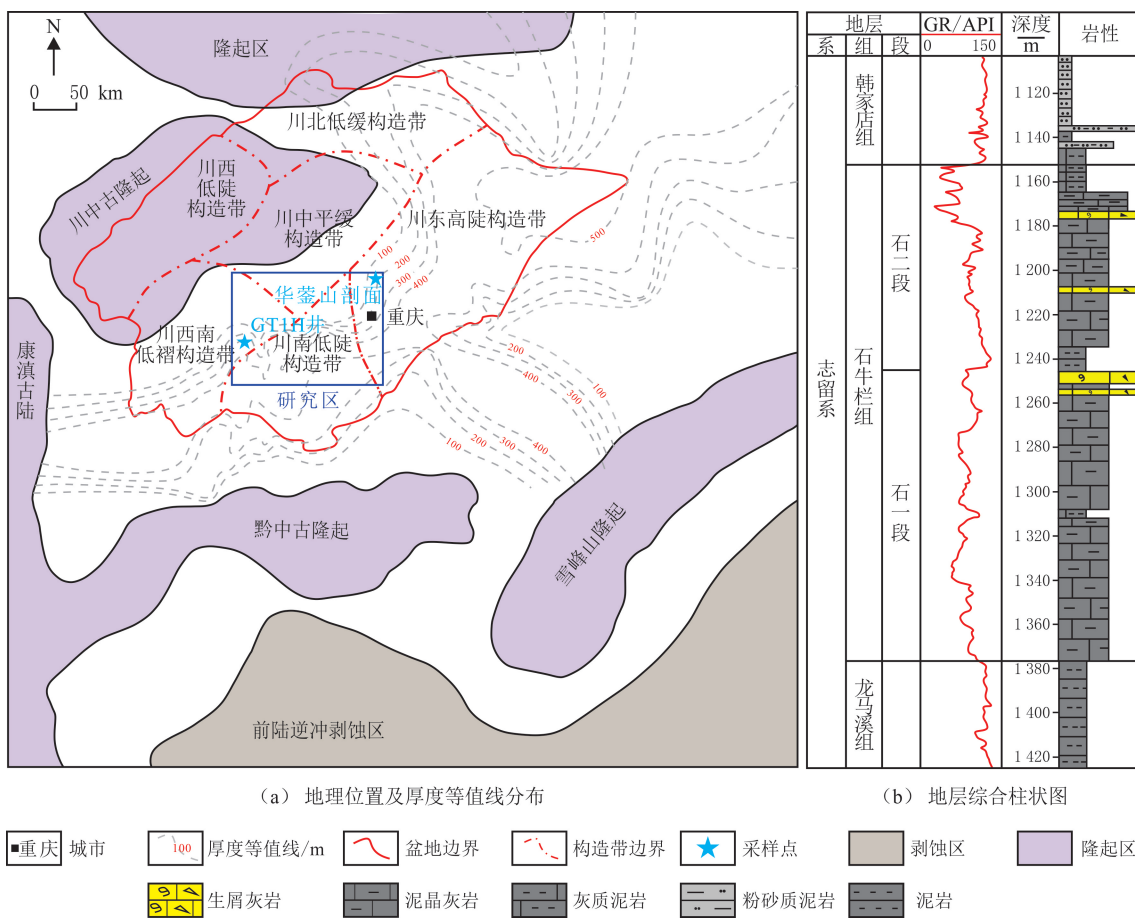


图1 渝西地区地理位置及石牛栏组地层厚度等值线分布、地层综合柱状图
Fig.1 Geographic location of Western Chongqing and thickness contour lines and stratigraphic column of the Early Silurian Shiniulan Formation

渝西地区志留纪总体处于海洋环境,早志留世处于深水陆棚环境,海平面较高,沉积龙马溪组;早—中志留世伴随盆地东南部雪峰山古隆起形成及受向北逐渐挤压作用,供应大量陆源碎屑,川东南地区形成小河坝组海相三角洲碎屑岩沉积,在未受陆源影响的区域沉积同时异相的石牛栏组碳酸盐岩和泥页岩^[29];中—晚志留世,川中古隆起持续隆升,导致川中古隆起和康滇古陆供应大量物源,形成韩家店组海相三角洲沉积^[30]。渝西地区志留系由下至上依次发育龙马溪组、石牛栏组、韩家店组,未见与石牛栏组同时异相的小河坝组碎屑岩发育。在渝西地区更靠近川中古隆起的西北方向,石牛栏组二段及韩家店组被剥蚀,导致二叠系梁山组或栖霞组直接覆盖在石牛栏组之上^[19]。石牛栏组岩性包括亮晶生屑灰岩、泥晶灰岩、灰

质泥岩和泥页岩(见图 1(b))。根据岩性和自然伽马测井曲线关系,将石牛栏组划分为石牛栏组二段(石一段)和石牛栏组二段(石二段)(见图 1(b)),石一段沉积时期整体处于海退期,石二段沉积时期海平面升高,岩性上表现为石一段顶部亮晶生屑灰岩或泥质灰岩向石二段底部泥页岩过渡,电性特征表现为界面处向上 GR 突变增高。

2 沉积环境演化

2.1 古地貌格局与地层展布特征

渝西地区石牛栏组展布特征与沉积厚度受古地貌格局特征影响。根据井—震地层标定,川南地区由北至南发育北部环川中古隆起古地貌高带、中部古地貌洼地和南部环黔中古隆起古地貌高带 3 个古地貌单元,渝西地区主要包括前两个古地貌单元^[27,31]。

根据渝西地区钻遇石牛栏组的 100 余口井地质资料,以及石牛栏组岩电响应关系,进行地层精细划分对比,统计每口井石一段和石二段厚度,绘制石一段和石二段厚度平面分布图(见图 2)。石一段厚度为 0~131 m,呈北东—南西向带状展布。泸州地区 L212 井附近地层最厚,约为 130 m,向川中古隆起方向逐渐减薄歼灭(见图 2(a));石二段整体厚度更大,最厚处位于 Y101 井区附近(约为 380 m),靠近川中古隆起地层逐渐减薄,在 JYT1、L16 和 L7 井附近地层受到剥蚀,厚度较薄,约为 0~120 m(见图 2(b))。渝西地区石牛栏组沉积受古地貌单元控制明显,石牛栏组同沉积时期,川中古隆起开始显著活动,对渝西地区的沉积地貌格局产生明显控制作用。

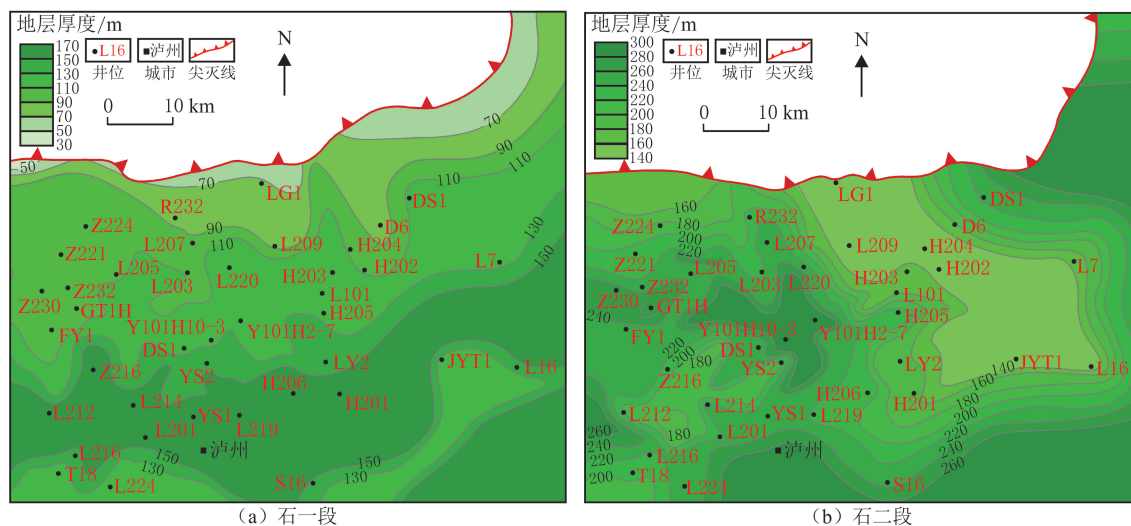


图 2 渝西地区石牛栏组厚度分布

Fig. 2 Thickness distribution of members of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

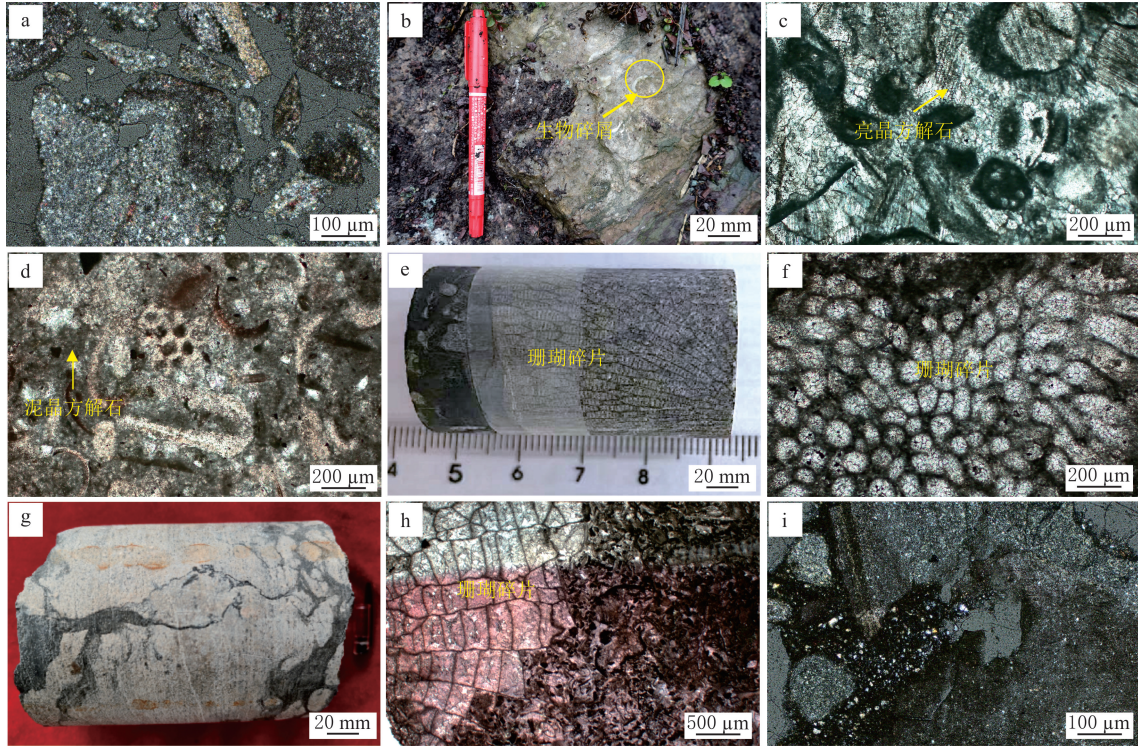
2.2 沉积体系类型及特征

根据研究区钻测井资料及岩心、薄片观察,渝西地区石牛栏组沉积于碳酸盐岩缓坡和陆棚体系。碳酸盐岩缓坡体系包括礁滩相、内缓坡相和中—外缓坡相,陆棚体系主要为浅水陆棚相。

碳酸盐岩内缓坡相处于环川中古隆起的浅水高地貌区,水体能量相对中—外缓坡和陆棚相较高,以细粒沉积为主,岩性主要包括泥晶灰岩、泥质灰岩等,可见少量生物碎屑(见图 3(a))。内缓坡相局部古地貌高地水动力较强,发育高能颗粒滩,周期性暴露于水面,岩性主要包括亮晶砂屑灰岩、亮晶生屑灰岩和鲕粒灰岩(见图 3(b-h)),多与滩间泥质(晶)灰岩互层分布,可见珊瑚碎片(见图 3(e-f)),华蓥山野外露头生物礁灰岩中可见较为完整的珊瑚等造礁生物化石^[19]。礁滩相主要发育亮晶生屑灰岩,生屑类型以珊瑚为主,测井曲线自然伽马 GR 小于 90 API。

碳酸盐岩中—外缓坡相相对内缓坡相更深,沉积物泥质质量分数升高,粒度变细,岩性以泥质灰岩、灰质泥岩为主^[18-19],浅水陆棚相相对中—外缓坡相沉积水体进一步加深,沉积物泥质质量分数最高,粒度最

细,主要发育泥岩、粉砂质泥岩等(见图3(i)),具有水平层理或块状构造。受局部古地貌高带的影响,浅水陆棚相发育孤立的碳酸盐岩礁滩相(见图4),形成生物碎屑灰岩,生屑类型包括藻类、介壳类、有孔虫类、珊瑚类,颗粒间多为亮晶胶结,可见岩溶角砾及溶沟发育^[19]。



(a) 灰质泥岩,内缓坡,石一段,3 752.0 m, H205井; (b) 生屑灰岩,内缓坡礁滩,华蓥山石牛栏组野外剖面; (c) 亮晶生屑灰岩,内缓坡礁滩,华蓥山石牛栏组野外剖面; (d) 含生屑泥晶灰岩,内缓坡礁滩,华蓥山石牛栏组野外剖面; (e-f) 生屑灰岩,内缓坡礁滩,石一段,3 577.0 m, GT1H井; (g-h) 生屑灰岩,内缓坡礁滩,石一段,3 757.0 m, T18井; (i) 泥岩,石二段,浅水陆棚,3 568.0 m, JYT1井

图3 渝西地区石牛栏组沉积相带岩性特征

Fig. 3 Petrographic features of different sedimentary facies of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

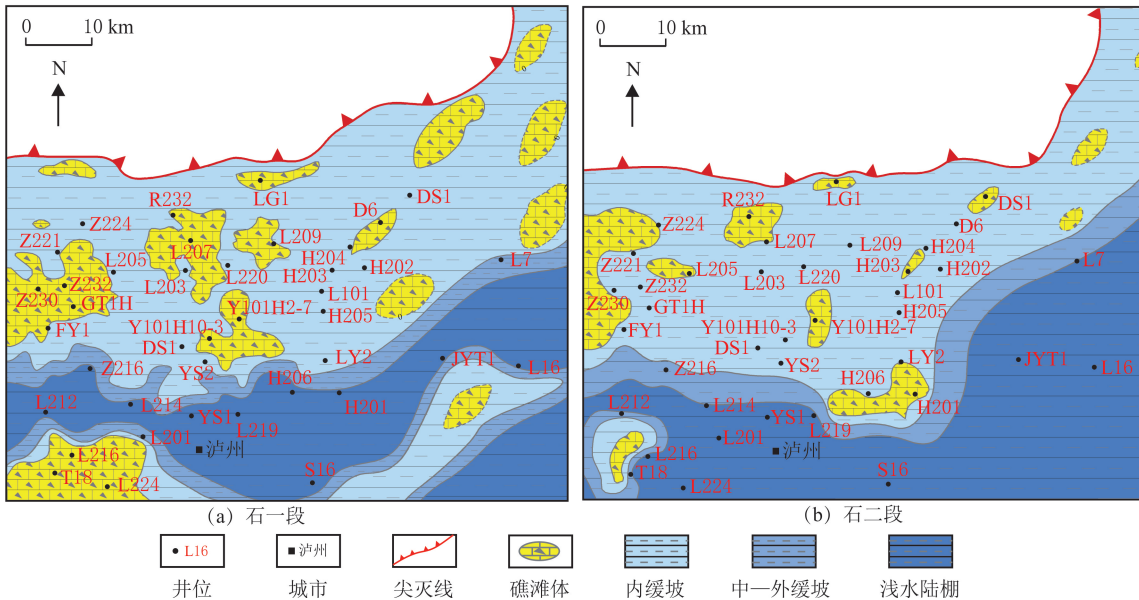


图4 渝西地区石牛栏组沉积相分布

Fig. 4 Sedimentary facies distribution of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

2.3 沉积体系演化

早志留世龙马溪组沉积时期,渝西地区整体处于深水陆棚环境,发育龙马溪组泥页岩^[32]。石牛栏组沉积早期,整体上继承早志留世的构造格局,川中隆起持续抬升扩展,石一段沉积时期海平面持续下降^[22],形成环隆起分布的构造高带,碳酸盐岩内缓坡相带范围逐渐扩大。石一段沉积晚期,海平面在石牛栏组沉积期的最低点,内缓坡相带中局部古地貌高地普遍发育礁滩相灰岩(见图 4(a));石二段沉积时期,海平面逐渐上升,碳酸盐岩内缓坡和礁滩相沉积范围缩小,碳酸盐岩中一外缓坡和浅水陆棚相范围扩大,礁滩相灰岩发育程度降低(见图 4(b))。这一沉积演化特征是中一晚志留世盆地周缘构造运动及海平面变化的综合结果。

3 储层成岩作用

3.1 矿物组成

根据岩石矿物组成、生物碎屑质量分数、胶结物和基质类型,渝西地区石牛栏组岩性包括亮晶生屑灰岩、泥晶灰岩、灰质泥岩和泥岩(矿物颗粒粒级小于 $62.5 \mu\text{m}$)(见图 5)。亮晶生屑灰岩中碳酸盐矿物质量分数大于 75%,生物碎屑质量分数大于 50%,生屑类型包括珊瑚、棘皮类(海百合茎)和腕足类等,生物碎屑颗粒间为亮晶方解石胶结物,方解石晶体为中晶—粗晶结构(见图 6(a-b))。含生屑泥晶灰岩碳酸盐矿物质量分数为 50%~75%,生物碎屑质量分数小于 25%,生屑类型主要为腕足类和介形虫,基质为泥晶方解石(见图 6(c-d))。灰质泥岩碳酸盐矿物质量分数小于 25%,无生物碎屑,泥岩主要由石英、长石和黏土矿物组成,虽然成分上不以黏土矿物为主,但矿物颗粒粒级小于 $62.5 \mu\text{m}$ 。

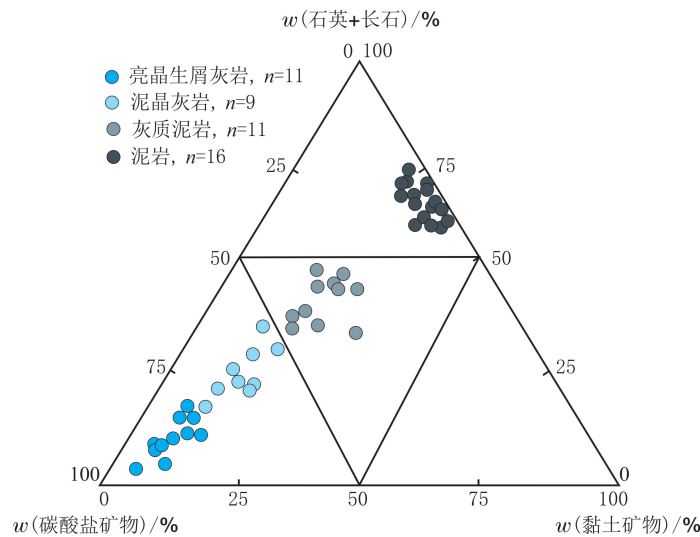


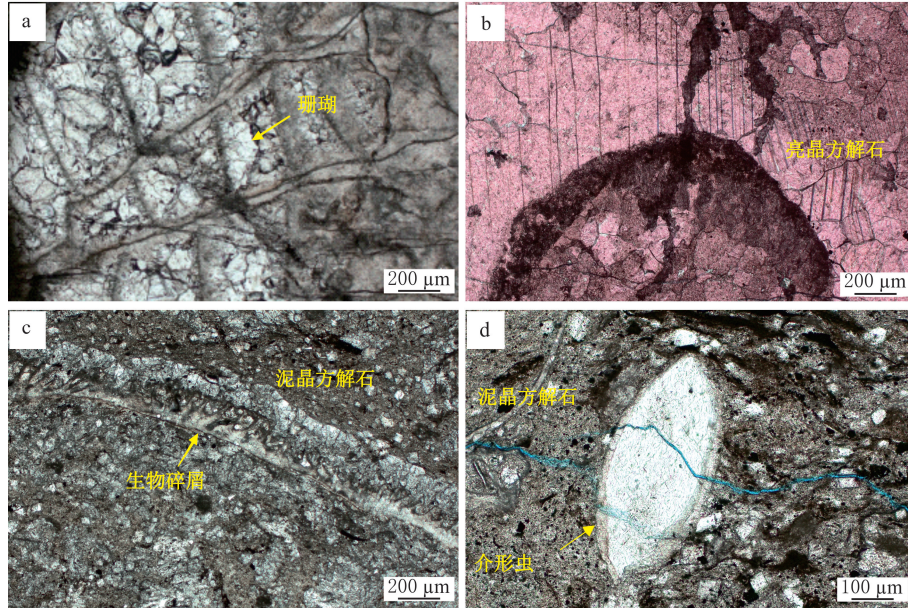
图 5 渝西地区石牛栏组储层矿物成分三端元图

Fig. 5 Triangle chart of mineral compositions reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

3.2 地球化学特征

碳酸盐岩的碳、氧同位素可以反映当时的沉积环境,记录埋藏成岩过程对碳酸盐岩的改造程度。当 $\delta^{18}\text{O} < -5\text{‰}$ 时,表明灰岩遭受比较轻微的沉积后蚀变,其中的碳、氧同位素组成反映开始沉积时海水同位素组成;当 $\delta^{18}\text{O} < -10\text{‰}$ 时,表明灰岩可能经受强烈的后期成岩改造作用^[33-34],埋藏成岩过程中碳同位素变化较小^[35]。根据研究区石牛栏组灰岩储层的碳、氧同位素特征(见图 7(a)), $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-13.51\text{‰} \sim -10.88\text{‰}$ 之间,平均为 -12.11‰ ,指示石牛栏组灰岩可能经历强烈的成岩改造作用,强烈成岩改造后期导致 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 协同降低并具有正相关关系^[36],石牛栏组灰岩储层的碳、氧同位素无明显正相关关系,表明渝西地区石牛栏组灰岩储层经历较强的成岩改造。Mn/Sr 可以作为判别碳酸盐矿物成岩蚀变程度的指标^[37],当 $\text{Mn}/\text{Sr} < 3.00$ 时,岩石的原始同位素组成得到保留。渝西地区石牛栏组灰岩储层的微区

Mn/Sr 介于 0.38~16.71, 平均为 5.32, 表明灰岩储层经历较强的成岩改造, 部分微区微量元素可以反映成岩流体信息。根据 KEITH M L 等^[38] 提出的样品测试值($\delta^{18}O$)与样品平均值($\delta^{18}O_A$)和第四纪海水平均值($\delta^{18}O_Q$)之间的差值对 $\delta^{18}O$ 进行校正, 利用古盐度计算公式^[38]和古温度计算公式^[39], 计算石牛栏组灰岩储层沉积时古盐度为 131~133, 高于 120, 为海水沉积环境; 古温度介于 15.8~27.6 °C (见图 7(b))。



(a) 含珊瑚碎片亮晶生屑灰岩, 华蓥山石牛栏组野外剖面; (b) 亮晶生屑灰岩中亮晶方解石胶结, 华蓥山石牛栏组野外剖面 (染色); (c) 含生物生屑碎屑泥晶灰岩, 3 571.5 m, GT1H井; (d) 含生物生屑碎屑泥晶灰岩, 3 571.9 m, GT1H井 (铸体薄片)

图 6 渝西地区石牛栏组灰岩储层岩相

Fig. 6 Lithofacies of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

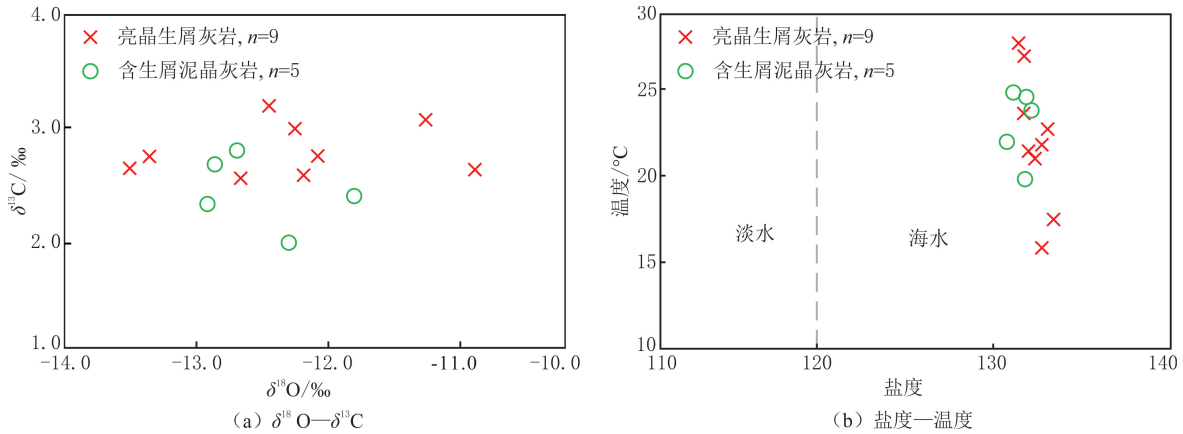


图 7 渝西地区石牛栏组灰岩储层全岩碳、氧同位素特征

Fig. 7 Carbon and oxygen isotopic characteristics of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

不同成岩环境下, 生物碎屑和碳酸盐胶结物呈不同形态和结构, 记录碳酸盐岩成岩历史, 其中阴极发光和微量元素可以识别成岩阶段和成岩流体性质^[40-41]。根据亮晶生屑灰岩和泥晶灰岩的显微结构特征, 识别同生、准同生、表生和埋藏 4 个成岩阶段, 其中, 同生、准同生和表生阶段分析矿物为方解石胶结物, 埋藏阶段分析矿物为白云石。碳酸盐岩中稀土元素不易被后期成岩作用改变, 稀土元素质量分数、异常因数和配分模式能够有效记录成岩流体信息^[42-43]。同生阶段为正常海水沉积环境, 形成于海水环境的方解石基质并不具有左倾的稀土配分模式和 Ce 负异常 (见图 8(a-b)), 显示 MREE 富集的帽型结构, 相似于准同

生阶段方解石胶结物(见图 8(b-c)),表明同生阶段形成的高镁方解石或文石并不稳定,在转变为稳定状态过程中吸附/解析稀土元素,从而形成稀土元素的分馏^[44-45]。同生阶段方解石基质受准同生阶段成岩流体影响,不能反映原始海水的信息。准同生阶段方解石胶结物具有 MREE 富集的配分模式和中—弱的 Eu 负异常,无 Ce 负异常和 Gd 负异常(见图 8(c)),与河水和海底孔隙水的特征相似^[45-47],表明准同生阶段方解石胶结物形成于大气淡水和海水混合水。

埋藏阶段白云石胶结物显示较平坦的稀土配分模式和 Eu 正异常, MREE 相对富集,无 Ce 负异常和 Gd 负异常,相似于孔隙水和黏土矿物(见图 8(a,d)),表明白云石形成于埋藏白云石化,来源于地层流体,地层流体中 Mg^{2+} 来源于埋藏成岩阶段黏土矿物转化。表生阶段方解石胶结物表现平坦的稀土配分模式和弱—无 Eu 异常、正 La 异常,稀土元素质量分数较低(见图 8(e)),表明表生阶段方解石胶结物形成于大气淡水。根据研究区 Fe/Mn、Mn/Sr、Sr/Ba、Na+K 和 $\sum REE$ (见图 8(f-i)),同生、准同生和表生阶段方解石显示相似的微量元素比值特征,准同生和表生阶段方解石具有更大 Sr/Ba 变化范围,同生和准同生阶段方解石 $\sum REE$ 质量分数较高,与稀土元素特征指示结果一致。埋藏阶段白云石显示 Fe/Mn 和 Na+K 较高, Mn/Sr 和 Sr/Ba 较低(见图 8(f-i)),与其他阶段明显不同,表明埋藏阶段白云石形成于孔隙水, Fe/Mn 较高,反映孔隙流体化学成分受黏土矿物转化的影响,具有明显 Fe 质量分数较高的特征。

渝西地区石牛栏组自同生阶段成岩流体经历海水、混合水、大气淡水和孔隙水的变化,不同的成岩流体来源导致沉淀的碳酸盐胶结物中 Fe、Mn、Sr、Ba、Na 和稀土元素的质量分数不同。

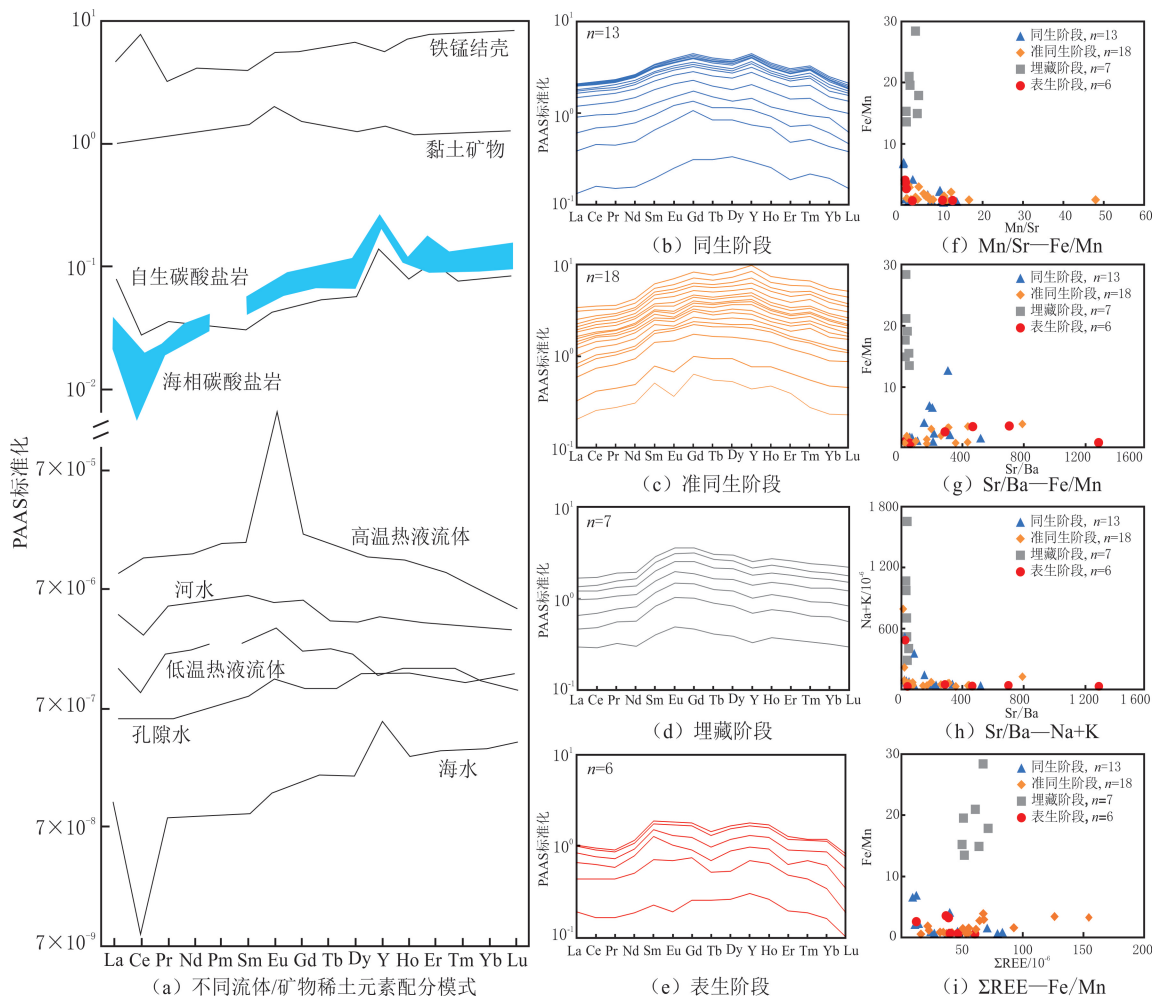


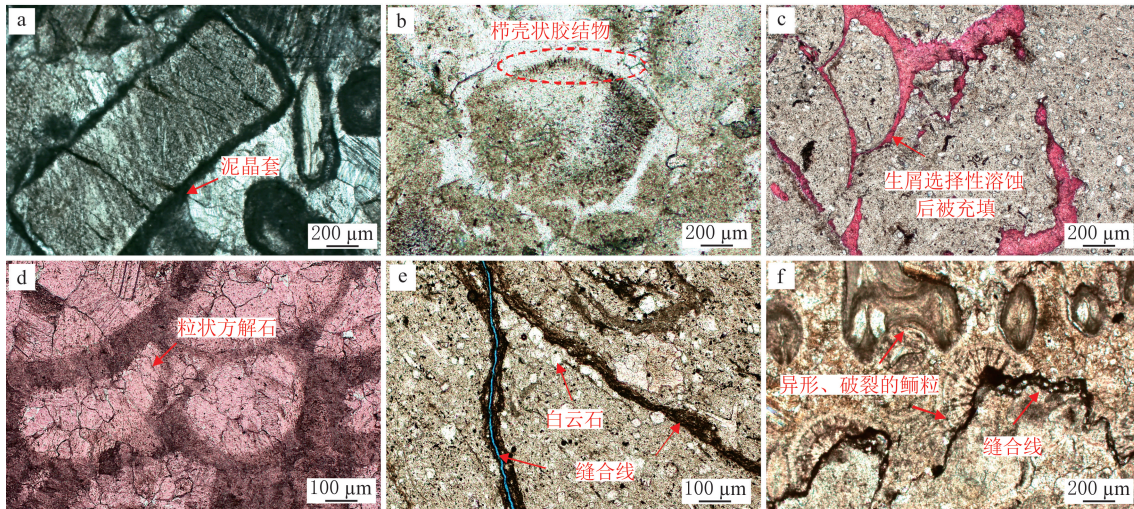
图 8 渝西地区石牛栏组灰岩储层微区稀土和微量元素特征(据文献[48]修改)

Fig. 8 Characteristics of in-situ rare earth and trace elements of limestone reservoirs from the Shiniulan Formation in Western Chongqing(modified by reference[48])

3.3 成岩演化阶段

3.3.1 同生阶段

在同生阶段海水沉积环境下,珊瑚、似球粒、双壳类和腕足类等底栖生物碎屑显示明显的泥晶化和胶结作用(见图9(a-b))。泥晶化是菌藻类对碳酸盐颗粒(生屑)进行穿孔,泥晶化作用导致颗粒内部结构消失而呈泥晶质颗粒。研究区石牛栏组灰岩中颗粒外部形成泥晶套(见图9(a))。海水环境中形成的胶结物形态多为纤维状、放射状、栉壳状,珊瑚格架和生物碎屑周缘可见胶结物(见图9(b)),原因是 Mg^{2+} 加入导致碳酸盐晶体沿单一轴(C轴)生长速度加快,形成纤维状或针状形态^[5,49]。海水中Fe和Mn质量分数和配分因数较低,胶结物Fe、Me质量分数低^[50-51],亮晶生屑灰岩的珊瑚格架和生物碎屑周缘的海相胶结物基本不发光(见图10(a-d))。同生阶段的泥晶化和海水胶结作用属于保持性成岩作用^[52],对储集空间没有明显的破坏和建设影响,在两种储层岩性中没有明显差异(见图11)。



(a) 泥晶化作用, 华蓥山石牛栏组野外剖面; (b) 胶结作用, 海水环境中生物边缘胶结物, GT1H井, 3 575.9 m; (c) 淡水溶蚀作用, GT1H井, 3 573.7 m; (d) 胶结作用, 珊瑚体腔内粒状方解石胶结, GT1H井, 3 570.9 m; (e-f) 压实、压溶作用产生的缝合线和鲕粒变形, 华蓥山石牛栏组野外剖面(铸体薄片)

图9 渝西地区石牛栏组灰岩储层成岩演化特征

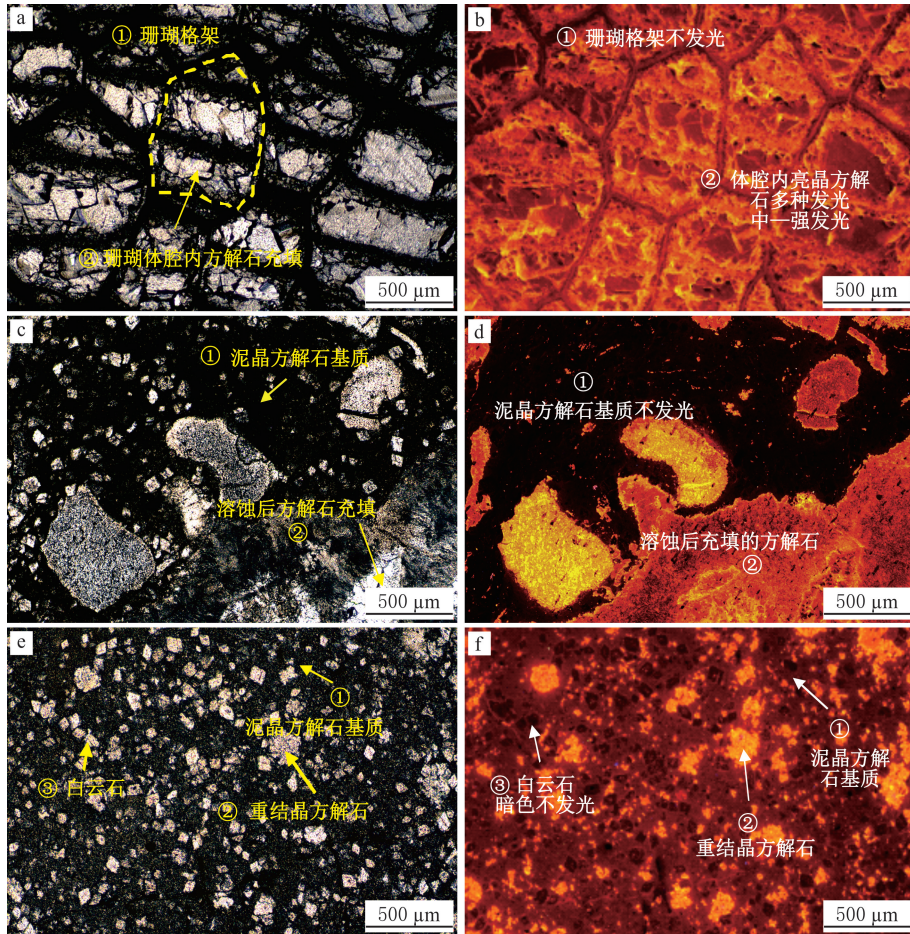
Fig. 9 Diagenetic evolution of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

3.3.2 准同生阶段

准同生阶段为海水—大气淡水混合环境,主要成岩作用有溶蚀作用和胶结作用。溶蚀作用表现为生物碎屑骨架的选择性溶蚀,海水环境中生物骨架钙化,主要成分为文石或高镁方解石,受大气淡水的影响,生物骨架易被选择性溶蚀而形成生物铸模孔,形态受原始生物形态控制(见图9(c))。大气淡水溶蚀后,在孔隙内沉淀方解石胶结物,方解石胶结物的形态与海水环境中形态有明显区别,呈等轴粒状生长(见图9(d))。大气淡水的Fe、Mn质量分数高,大气淡水的输入是非连续均质的^[53-54],方解石阴极发光的颜色和强度不是单一固定,而是呈中等—强的阴极发光特征(见图10(c-d))。亮晶生屑灰岩和泥晶灰岩经历强烈的大气淡水溶蚀和胶结作用,亮晶生屑灰岩中被溶蚀部分包括生物碎屑和方解石晶粒,泥晶灰岩中被溶蚀部分主要是生物碎屑(见图11)。

3.3.3 埋藏阶段

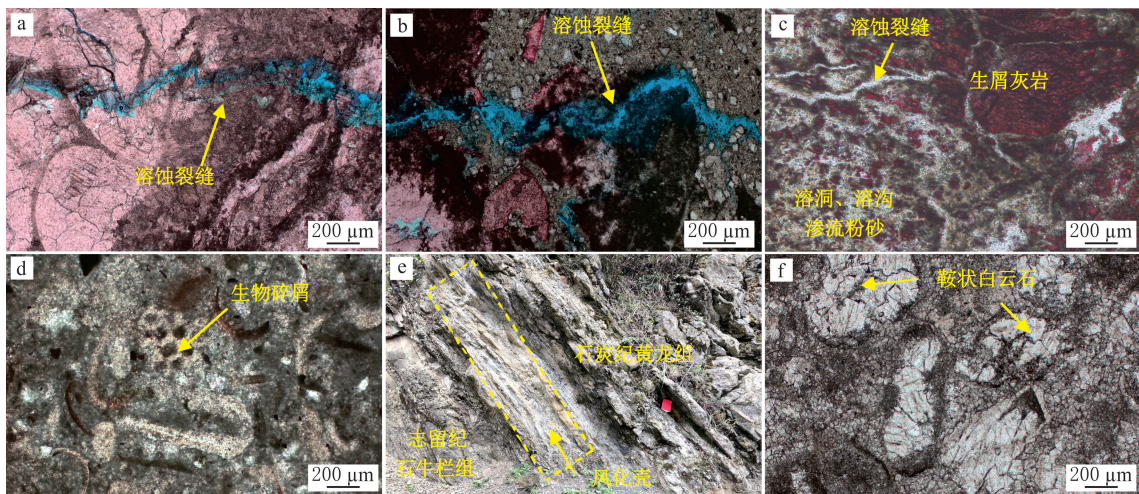
埋藏阶段的成岩作用主要为埋藏白云石化作用和压实—压溶作用。埋藏白云石化作用发生于浅—中埋藏阶段的孔隙水环境,镜下观察粉—细晶自形白云石(见图10(e)),与热液作用形成的鞍形白云石和蒸发浓缩—回流渗透作用形成的他形白云石具有明显差异^[55]。压实过程中高镁方解石向低镁方解石转化和黏土矿物转化(如蒙脱石向伊利石转化)可以提供 Mg^{2+} ,同时压实作用为富镁流体的运移提供驱动力^[56]。伴随压实作用增强,岩石发生压溶作用,局部颗粒在压力溶解过程中形成粗糙或波状的缝合线(见图9(e)),部分鲕粒经压溶作用后破裂(见图9(f))。埋藏过程中主要的产物是颗粒之间的自生方解石和白云石胶结物,阴极发光特征分别是强发光和不发光(见图10(e-f)),说明产生的白云石富铁,为铁白云石。



(a-b) 亮晶生屑灰岩, 珊瑚体腔粒状方解石, GT1H井, 3 573.7 m; (c-d) 泥晶灰岩, 部分溶蚀后方解石充填, GT1H井, 3 575.9 m; (e-f) 泥晶灰岩, 重结晶方解石及白云石, GT1H井, 3 575.9 m

图 10 渝西地区石牛栏组灰岩储层阴极发光特征

Fig. 10 Cathodoluminescence characteristics of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing



(a-b) 表生岩溶裂缝, GT1H井, 3 576.5 m (染色、铸体薄片); (c) 岩屑岩溶特征, Z205井, 3 484.0 m (染色); (d) 志留系石牛栏组生屑灰岩, 华蓥山石牛栏组野外剖面; (e) 志留系石牛栏组与上覆石炭系黄龙组之间存在风化壳, 华蓥山石牛栏组野外剖面; (f) 石炭系黄龙组生屑灰岩, 华蓥山石牛栏组野外剖面

图 11 渝西地区石牛栏组表生岩溶特征

Fig. 11 Epidiagenetic characteristics of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

胶结和压实—压溶作用是破坏性作用,损失亮晶生屑灰岩和泥晶灰岩大量原生孔和溶蚀孔,但是亮晶灰岩相比于泥晶灰岩的埋藏白云石化程度更低,对孔隙的保护更有利(见图 11)。

3.3.4 表生阶段

表生阶段主要为大气淡水岩溶作用。大气淡水溶蚀形成大量不具有选择性的溶孔和溶缝,判断表生阶段形成的依据之一是切穿准同生阶段形成的胶结物(见图 11(a-b))。该成岩阶段与后期构造抬升导致石牛栏组被抬升到地表有关,岩溶流体渗入通常伴随陆源物质(如渗流粉砂)(见图 11(c))。表生岩溶一般由较大规模的海平面升降和构造事件引起,经常与区域不整合面和长时间地层缺失伴生^[57]。四川盆地川南地区石牛栏组环川中古隆起高带处的地层剥蚀严重,华蓥山石牛栏组野外剖面可见石牛栏组和上覆石炭系黄龙组之间存在一层淡黄色泥质风化壳(见图 11(d-f))。受区域构造抬升影响而暴露于地表,表生岩溶范围在空间上具有明显的地理位置特征,主要沿川中古隆起围斜区发育^[19];在垂向上具有明显的分带性,石二段礁滩体灰岩段受表生岩溶改造更强,在石二段剥蚀强区域,石一段礁滩体灰岩段受表生岩溶改造影响^[18]。

孔隙演化和成岩过程密切相关,渝西地区石牛栏组亮晶生屑灰岩和泥晶灰岩储层演化模式见图 12。由图 12 可以看出,亮晶生屑灰岩沉积于内缓坡礁滩体,由于地理位置更高,水体能量更强,残余原生物体腔孔更多,碳酸盐矿物质量分数更高,相比于泥晶灰岩更容易受岩溶流体溶蚀的改造。

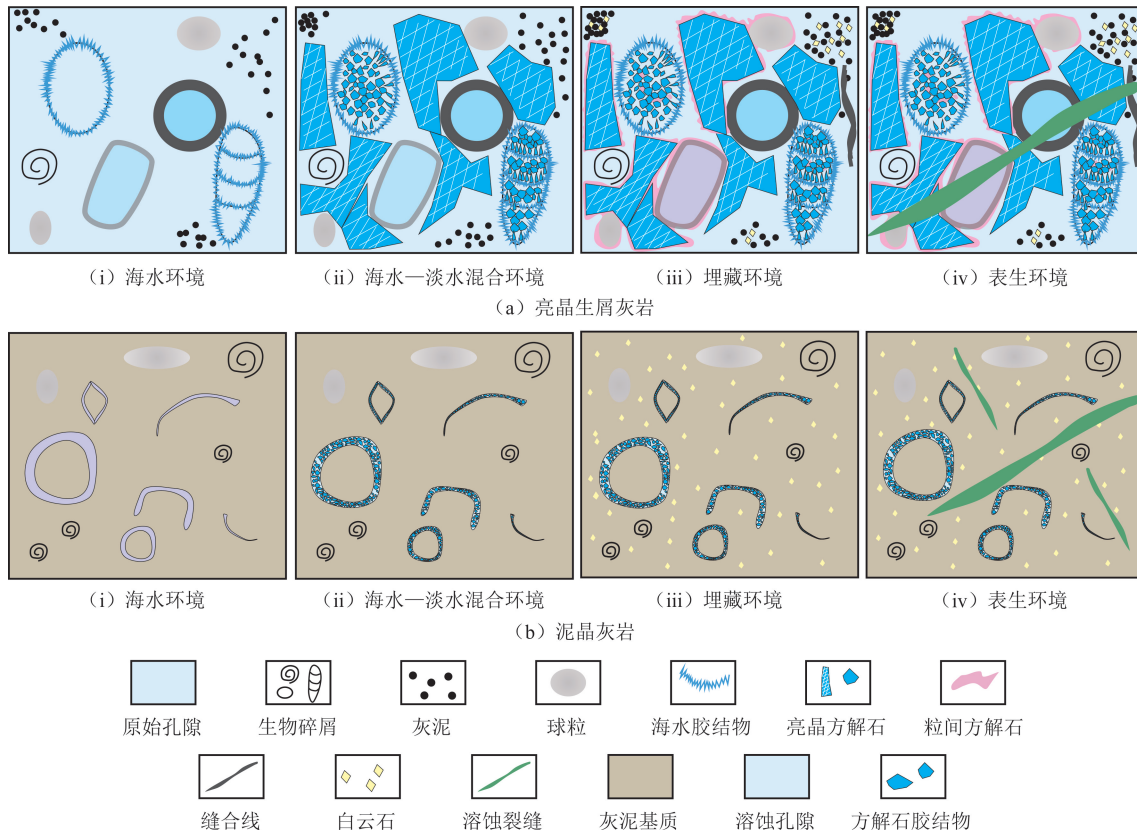


图 12 渝西地区石牛栏组亮晶生屑灰岩和泥晶灰岩储层演化模式

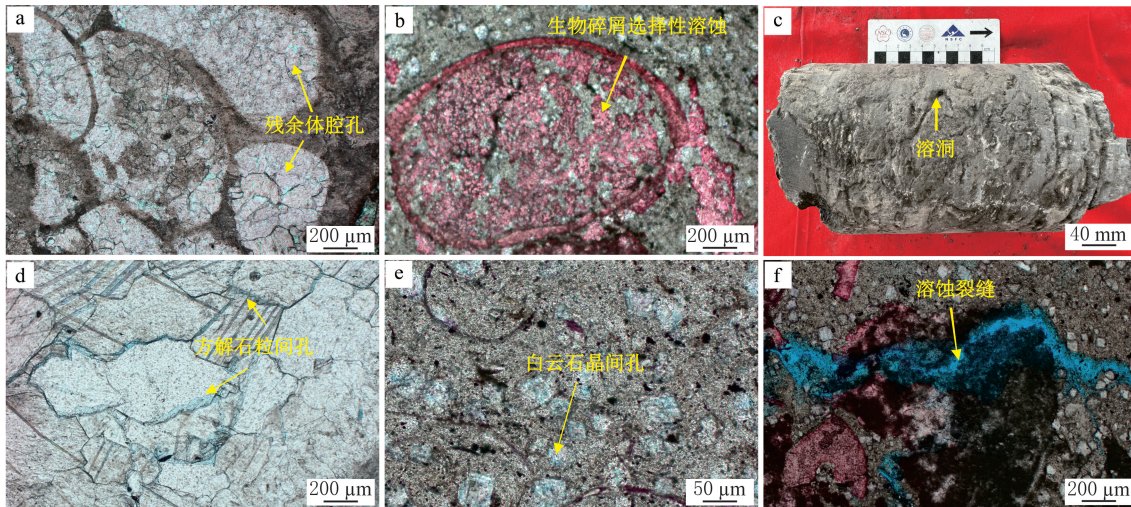
Fig. 12 Reservoir evolution of the phaneritic bioclastic limestones and argillaceous limestones from the Shiniulan Formation in Western Chongqing

4 储层特征

4.1 储集空间类型

岩心和铸体薄片观察表明,渝西地区石牛栏组灰岩储集空间类型主要包括原生孔隙和溶蚀孔、缝。珊瑚体腔孔为原生孔隙(见图 13(a)),孔隙后期容易被充填胶结,残余生物体腔孔体积约占总孔隙的 20%。

大气淡水溶蚀形成生物碎屑溶蚀孔洞(见图 13(b-c)),由于生物碎屑多为高镁方解石或文石,性质不稳定,易被大气降水或混合水选择性溶蚀^[55],溶蚀孔隙体积约占总孔隙的 20%。可见一期溶蚀裂缝,可能由表生阶段流体溶蚀形成(见图 13(f)),表生岩溶作用发生在地层固结成岩后,裂缝形态上切穿早期形成的胶结物。溶蚀裂缝体积约占总孔隙的 50%。方解石粒间孔、白云石晶间孔等(见图 13(d-e))较少,体积约占总孔隙的 10%。



(a) 残余生物体腔孔, 亮晶生屑灰岩, GT1H井, 3 571.5 m; (b) 生物碎屑溶蚀孔, 含生屑泥晶灰岩, GT1H井, 3 569.0 m; (c) 溶洞, 亮晶生屑灰岩, GT1H井, 3 571.4~3 571.7 m; (d) 方解石粒间孔, 亮晶生屑灰岩, GT1H井, 3 575.9 m; (e) 白云石晶间孔, 含生屑泥晶灰岩, GT1H井, 3 573.8 m; (f) 溶蚀裂缝, 泥晶灰岩, GT1H井, 3 570.0 m

图 13 渝西地区石牛栏组灰岩储层主要储集空间类型

Fig. 13 Main reservoir space types of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

4.2 储层物性特征

渝西地区石牛栏组灰岩孔隙度和渗透率分布见图 14(a-b)。由图 14(a-b)可以看出,亮晶生屑灰岩孔隙度为 1.29%~4.88%,平均为 2.70%,渗透率为 $(0.008\sim 6.980)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $1.170\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。含生屑泥晶灰岩孔隙度为 0.59%~3.49%,平均为 2.09%,渗透率为 $(0.003\sim 0.810)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $0.240\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,孔渗条件低于亮晶生屑灰岩的。研究区亮晶生屑灰岩显示孔渗具有正相关关系,含生屑泥晶灰岩的孔渗没有明显相关关系,表明亮晶生屑灰岩存在更多有效性孔隙(见图 14(c))。

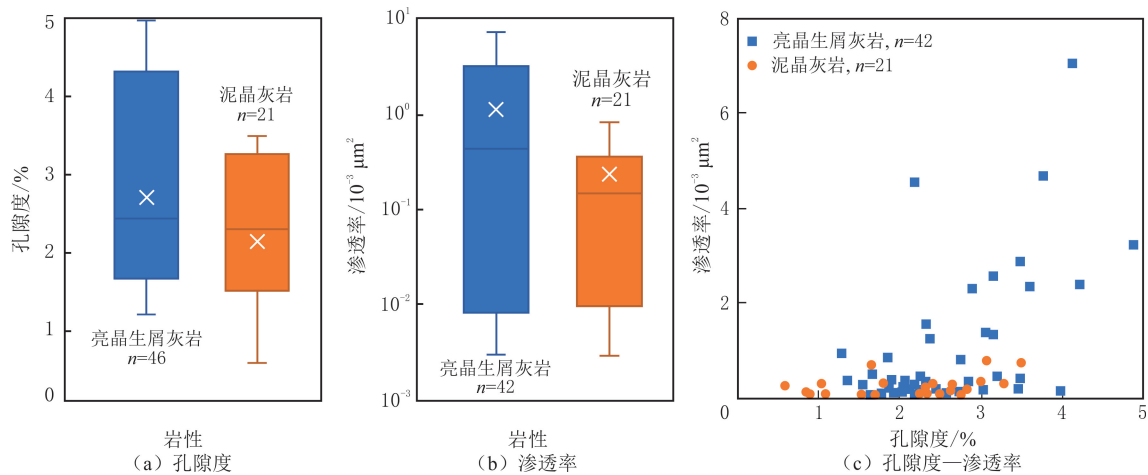


图 14 渝西地区石牛栏组灰岩储层孔隙度和渗透率

Fig. 14 Porosity and permeability of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

选取研究区亮晶生屑灰岩和含生屑泥晶灰岩典型样品进行核磁共振 T_2 谱和高压压汞实验,分析储层岩相的孔隙结构特征。亮晶生屑灰岩和含生屑泥晶灰岩的弛豫时间(T_2)在 0.1~1.0 ms 之间出现一

个强峰,亮晶生屑灰岩弛豫时间在 10.0~1 000.0 ms 之间呈连续多峰分布(见图 15(a));含生屑泥晶灰岩弛豫时间在 10.0~100.0 ms 之间出现一个峰(见图 15(b))。核磁共振 T_2 谱弛豫时间和孔隙大小呈正相关关系,可以获得岩样孔径分布,计算岩样 T_2 截止值,推算最小有效孔隙的孔径^[58-59]。弛豫时间为 0.1~1.0、10.0~100.0、100.0~1 000.0 ms 分别对应孔径为 2~100 nm、1~10 和 10~100 μm ^[58]。亮晶生屑灰岩和含生屑泥晶灰岩的孔径主要在 2 nm~10 μm 之间,其中亮晶生屑灰岩孔径为 10~100 μm 的孔隙或裂缝。 T_2 截止值代表最小有效孔隙对应的弛豫时间,亮晶生屑灰岩的 T_2 截止值小于含生屑泥晶灰岩的(见图 15),说明亮晶生屑灰岩的有效孔隙下限低。根据饱和与离心曲线,含生屑泥晶灰岩的饱和与离心曲线特征在 0.1~1.0 ms 之间差异不明显(见图 15(b)),表明这部分孔隙是无效的,与 T_2 截止值一致。

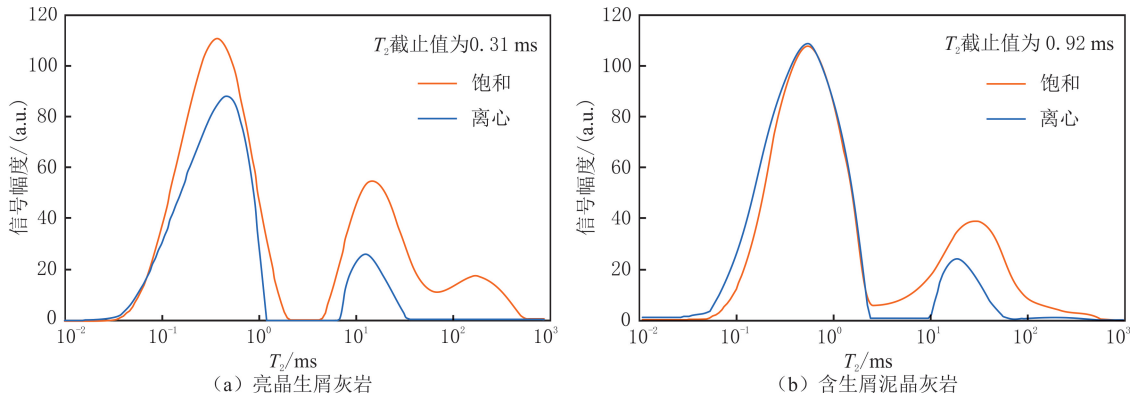


图 15 渝西地区石牛栏组灰岩储层核磁共振 T_2 谱

Fig. 15 T_2 spectral distribution of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

亮晶生屑灰岩的进汞曲线比含生屑泥晶灰岩的更平缓,亮晶生屑灰岩的最大汞饱和度(73.6%)高于含生屑泥晶灰岩的(60.1%),亮晶生屑灰岩的平均孔径更大(见图 16)。高压压汞实验在测试大尺寸孔喉($>40 \mu\text{m}$)存在一定局限性,造成部分微米级孔喉段的裂缝和孔洞尺寸不准确^[60]。核磁共振 T_2 谱显示亮晶生屑灰岩存在孔径为 10~100 μm 的孔隙或裂缝,对高压压汞实验分析的孔径造成一定影响,基于高压压汞实验的亮晶生屑灰岩平均孔径可能低于实际值。

综上所述,环川中古隆起内缓坡礁滩相的亮晶生屑灰岩为石牛栏组最为有利的储层岩性,物性和孔隙连通性相对较好,为裂缝—孔隙性储层。

5 有利储层形成机制

5.1 形成基础

根据研究区孔隙类型和成岩演化过程,有利储层形成需要 3 个因素:丰富的原生孔隙;准同生阶段岩溶作用形成的溶蚀孔缝;表生阶段岩溶作用形成的溶蚀孔缝。原生孔隙是灰岩储层形成的基础之一。由于生物碎屑质量分数高,原始的生物碎屑(如珊瑚和有孔虫)内部体腔孔和颗粒间孔隙占比高,亮晶生屑灰岩的原生孔隙更发育。这部分孔隙后期容易被胶结物充填,有一部分可以保留下来,即使后续成岩过程中腔体内充填方解石,充足的结晶空间也保持方解石晶型良好,颗粒间发育的粒间孔是碳酸盐岩主要的储集空间^[61](见图 13(a-d))。准同生和表生阶段经历两期岩溶改造,溶蚀作用形成次生孔隙、裂缝,能够改善储层质量,是利储层形成的重要影响因素(见图 11(a-b))。

5.2 沉积—成岩作用协同影响

在有利储层形成基础中,原生孔隙的形成、数量和生屑颗粒间的胶结物是亮晶方解石还是泥晶方解石(灰泥基质)与生物类型、水动力强弱有关,取决于沉积相分布(见图 17)^[62]。高水动力条件下,水体较浅,富体腔孔的珊瑚发育,并且生屑颗粒间原始的碳酸盐质点(灰泥)被冲刷干净,碳酸钙饱和成岩流体能够在原生孔隙中沉淀明亮的晶体^[63],形成原生孔隙发育的亮晶生屑灰岩。含生屑泥晶灰岩发育于水动力较弱的低能环境,碳酸盐质点在原地沉降而形成泥晶方解石,原生孔隙不发育。

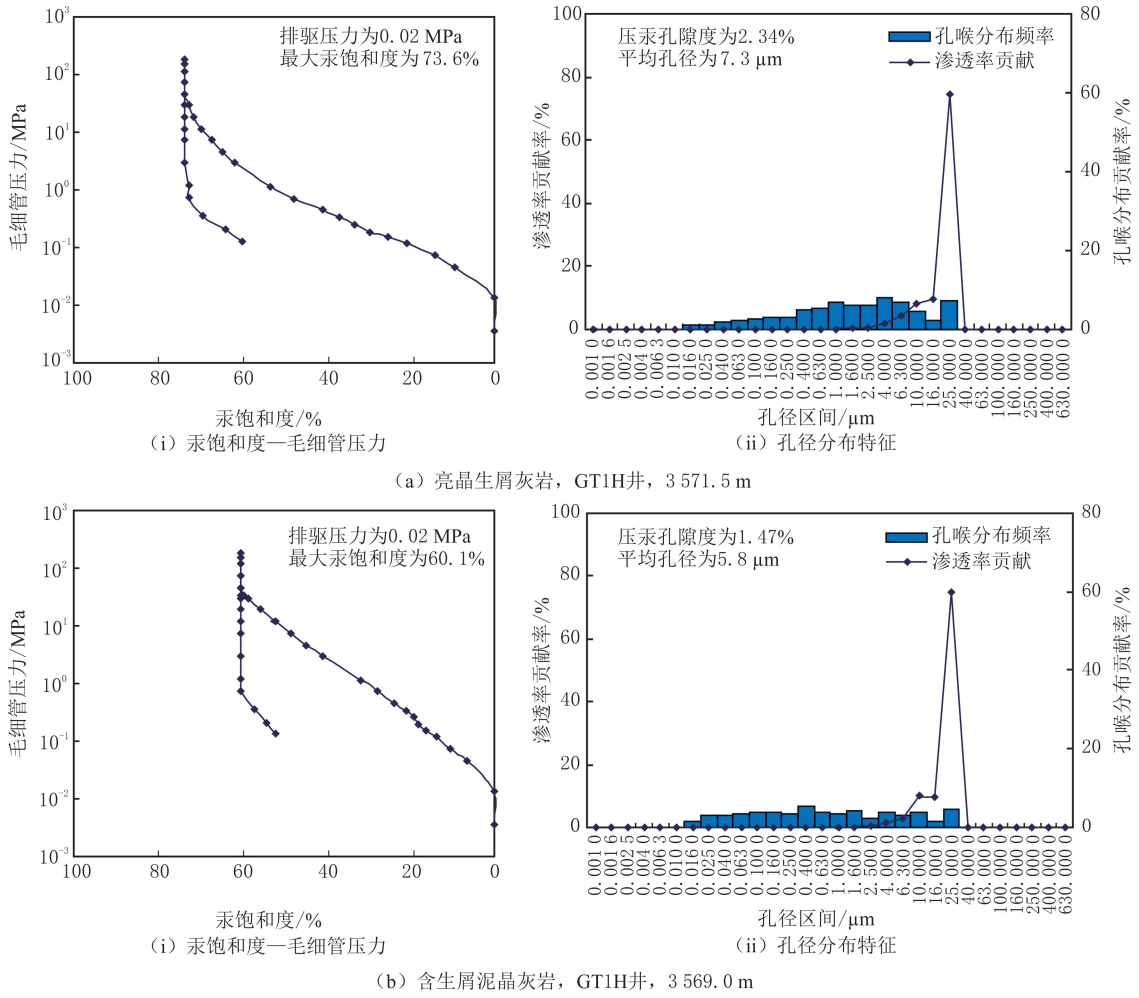


图 16 渝西地区石牛栏组灰岩储层毛细管压力曲线和孔径分布特征

Fig. 16 Capillary pressure curves and pore size distribution of limestone reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

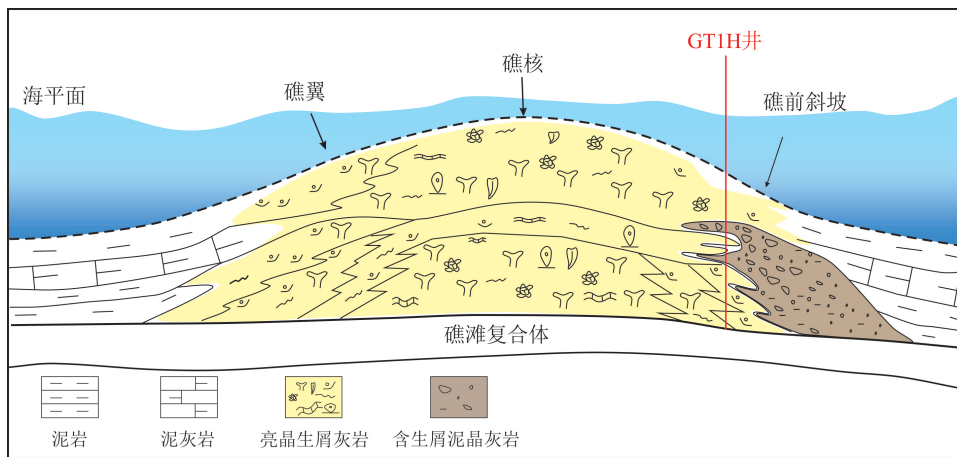


图 17 渝西地区复合礁滩相岩性分布

Fig. 17 Lithological distribution of composite reef-beach facies in Western Chongqing

原生孔隙能否被保留及碳酸盐岩固结成岩后储集性能受控于成岩作用^[64]。建设性成岩作用主要为准同生和表生阶段大气淡水溶蚀。石牛栏组沉积时期,海平面发生多期升降旋回^[18]。未完全固结的碳酸盐岩在海退阶段受大气淡水淋滤影响,产生一部分溶蚀孔。石一段沉积时期,总体处于海退阶段,古地貌

高地发育碳酸盐岩内缓坡礁滩相带,石一段形成大量亮晶生屑灰岩^[19],比泥晶灰岩处于更高的地理位置,更容易受大气淡水溶蚀影响(见图 18(a))。石二段沉积时期,海平面总体较高,碳酸盐岩内缓坡礁滩相带收缩,礁滩体处于更高的地理位置,石二段亮晶生屑灰岩比泥晶灰岩经历更强的大气淡水溶蚀。

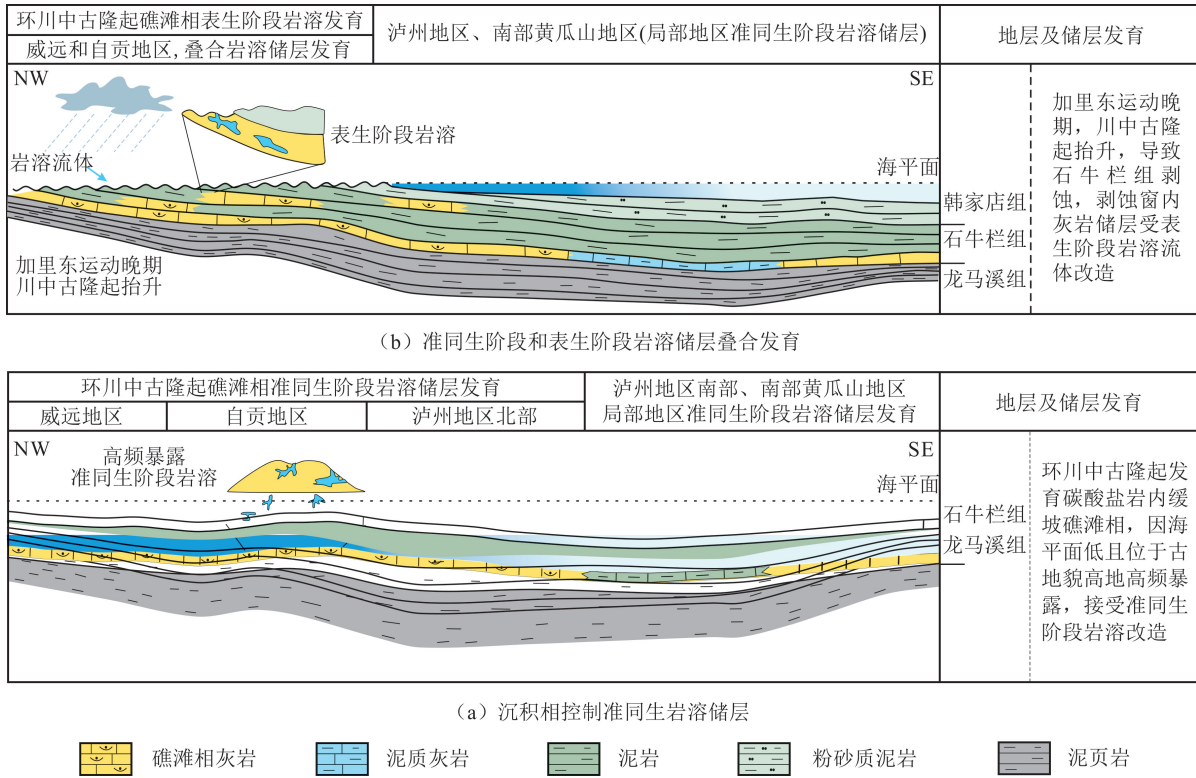


Fig. 18 Formation model of favorable reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

石牛栏组表生岩溶阶段,受广西运动影响,川中古隆起抬升,石牛栏组环川中古隆起围斜区广泛剥蚀^[64]。表生岩溶流体(大气淡水)沿剥蚀不整合面向下渗流,礁滩相亮晶生屑灰岩更易被溶蚀而产生岩溶裂缝和溶蚀孔洞(见图 18(b))。表生岩溶作用具有明显的垂向分带,主要影响石二段礁滩相灰岩段,在研究区北部地层歼灭线附近,部分钻井揭示石二段被剥蚀后残留较薄或被完全剥蚀,导致大气淡水可以直接影响石一段礁滩相灰岩段,形成叠合岩溶储层,最大程度上改善储层质量(见图 2)。在石牛栏组剥蚀区,由于亮晶生屑灰岩在沉积相带和准同生阶段大气淡水溶蚀方面比泥晶灰岩更具形成优质储层的优势,且亮晶生屑灰岩的孔隙连通性好,亮晶生屑灰岩在表生岩溶阶段能够促进大气淡水渗流,从而非选择性溶蚀方解石晶体和生物碎屑,形成比泥晶灰岩更好的储层条件。

准同生和表生阶段两期岩溶是主要的成岩影响因素,相比泥晶灰岩,亮晶生屑灰岩碳酸盐矿物质量分数更高,抗压实能力更强,对储层孔隙起一定程度的保护作用。亮晶生屑灰岩和泥晶灰岩中碳酸盐矿物质量分数相差不大(5%~20%)(见图 5),埋藏过程中的差异胶结和压实对储层产生一定影响,物性差异主要是由沉积相与溶蚀强度差异造成的。

有利储层的形成受沉积—成岩作用协同影响,建立渝西地区石牛栏组储层沉积—成岩作用协同演化模式(见图 18)。石牛栏—韩家店组沉积早、中期,川中古隆起持续隆升,黔中古隆起逐渐沉降,导致靠近川中古隆起周缘地区更易接受多期岩溶改造。川中古隆起周缘内缓坡礁滩相带至少经历石一段沉积晚期准同生阶段、加里东运动晚期表生阶段两期岩溶改造,储层品质较好。中—外缓坡和陆棚带经历石一段沉积晚期和石二段沉积时期准同生阶段岩溶作用,后期逐渐沉降而难以接受表生阶段岩溶改造,储层品质较差(见图 19)。

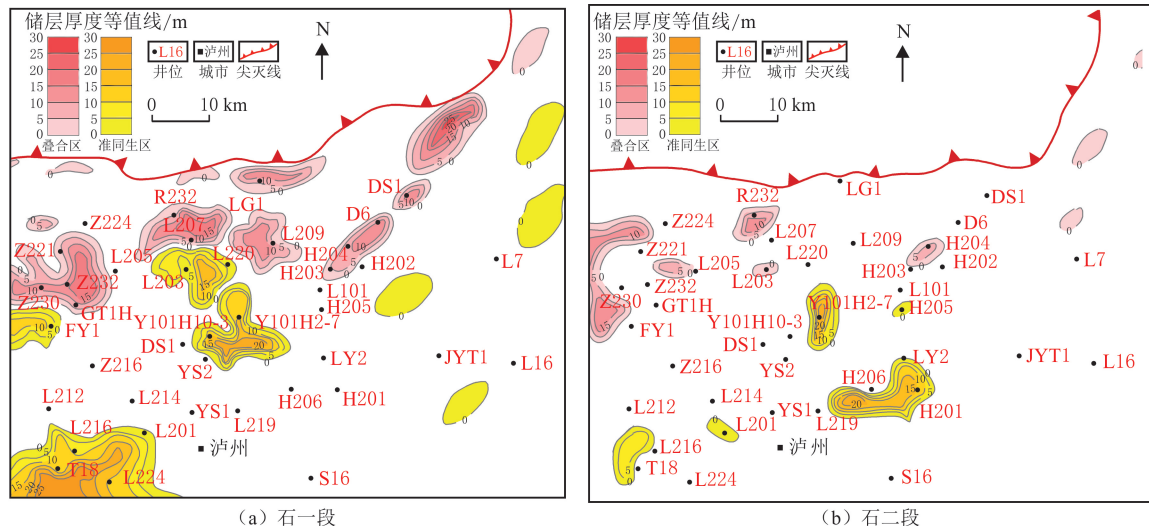


图 19 渝西地区石牛栏组有利储层平面分布

Fig. 19 Plane distribution of favorable reservoirs of the Shiniulan Formation in Western Chongqing

6 结论

(1) 渝西地区志留系石牛栏组沉积于川黔拗陷北侧, 地层由川中古隆起向东南方向逐渐增厚, 依次发育碳酸盐内缓坡、中—外缓坡和浅水陆棚沉积体系; 岩性包括灰岩、泥质灰岩和泥岩, 其中碳酸盐内缓坡礁滩相的亮晶生屑灰岩为主要储层岩相; 孔隙类型以残余生物体孔隙、溶蚀孔缝为主, 属于低孔低渗储层。

(2) 研究区石牛栏组灰岩经历同生、准同生、埋藏和表生 4 个成岩阶段。其中, 准同生和表生阶段成岩流体受大气淡水的影响, 石牛栏组内部灰岩发生岩溶作用, 改善储层质量。准同生阶段岩溶范围受沉积相控制, 表生阶段岩溶平面分布范围与地层剥蚀有关, 垂向上岩溶流体渗流范围与亮晶生屑灰岩的分布有关, 体现沉积—成岩作用对石牛栏组储层形成协同影响。

(3) 研究区石牛栏组环川中古隆起周缘内缓坡礁滩带为准同生阶段岩溶和表生阶段岩溶叠合区, 至少经历石一段沉积晚期准同生阶段岩溶、加里东运动晚期表生阶段岩溶改造, 储层品质较好; 向南逐渐过渡为中—外缓坡和浅水陆棚相, 在局部地貌高带接受准同生阶段岩溶作用, 后期逐渐沉降而难以接受表生阶段岩溶改造, 储层品质较差。

参考文献 (References):

- [1] 白国平. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征[J]. 古地理学报, 2006, 8(2): 241-250.
Bai Guoping. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(2): 241-250.
- [2] 李峰峰, 郭睿, 孙昭, 等. 中东 M 油田 Mishrif 组碳酸盐岩储集层分类及主控因素[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(5): 1-12.
Li Fengfeng, Guo Rui, Sun Zhao, et al. Classification and main controlling factors of carbonate reservoir of Mishrif Formation, M Oilfield in the Middle East[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(5): 1-12.
- [3] 胡素云, 李建忠, 王铜山, 等. 中国石油油气资源潜力分析与勘探选区思考[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 813-823.
Hu Suyun, Li Jianzhong, Wang Tongshan, et al. CNPC oil and gas resource potential and exploration target selection[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 813-823.
- [4] Ma Y S, Cai X Y, Li M W, et al. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 795-812.
- [5] 龚月, 高和群, 李小越, 等. 四川盆地及周缘页岩气赋存方式展布特征研究[J]. 非常规油气, 2023, 10(2): 49-56.
Gong Yue, Gao Hequn, Li Xiaoyue, et al. Study on the distribution characteristics of occurrence modes of shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(2): 49-56.
- [6] Liu Q Y, Jin Z J, Zhou B, et al. Main factors for large accumulations of natural gas in the marine carbonate strata of the Eastern Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2017, 2(2): 81-97.

- [7] 郭旭升,黄仁春,张殿伟,等.四川盆地海相碳酸盐岩全油气系统成藏特征与有序分布规律[J].石油勘探与开发,2024,51(4):743-758.
Guo Xusheng, Huang Renchun, Zhang Dianwei, et al. Hydrocarbon accumulation and orderly distribution of whole petroleum system in marine carbonate rocks of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024,51(4):743-758.
- [8] 马新华,杨雨,文龙,等.四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J].石油勘探与开发,2019,46(1):1-13.
Ma Xinhua, Yang Yu, Wen Long, et al. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,46(1):1-13.
- [9] 赵路子,汪泽成,杨雨,等.四川盆地蓬探1井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J].中国石油勘探,2020,25(3):1-12.
Zhao Luzi, Wang Zecheng, Yang Yu, et al. Important discovery in the second member of Dengying Formation in well Pengtan 1 and its significance, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(3):1-12.
- [10] 马永生,蔡勋育,赵培荣.中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):561-574.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(4):561-574.
- [11] 马新华,谢军,雍锐,等.四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J].石油勘探与开发,2020,47(5):841-855.
Ma Xinhua, Xie Jun, Yong Rui, et al. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(5):841-855.
- [12] 孙焕泉,周德华,蔡勋育,等.中国石化页岩气发展现状与趋势[J].中国石油勘探,2020,25(2):14-26.
Sun Huanquan, Zhou Dehua, Cai Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):14-26.
- [13] 聂海宽,金之钧,马鑫,等.四川盆地及邻区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J].石油学报,2017,38(2):160-174.
Nie Haikuan, Jin Zhijun, Ma Xin, et al. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017,38(2):160-174.
- [14] 佟恺林,周安富,罗强,等.四川盆地泸州中部地区龙马溪组构造裂缝期次及演化模式[J].东北石油大学学报,2024,48(5):17-26.
Tong Kailin, Zhou Anfu, Luo Qiang, et al. Tectonic fracture stages and evolution model of Longmaxi Formation in Central Luzhou Area, Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(5):17-26.
- [15] 蒲泊伶,董大忠,王凤琴,等.沉积相带对川南龙马溪组页岩气富集的影响[J].中国地质,2020,47(1):111-120.
Pu Boling, Dong Dazhong, Wang Fengqin, et al. The effect of sedimentary facies on Longmaxi shale gas in Southern Sichuan Basin [J]. Geology in China, 2020,47(1):111-120.
- [16] Ma Z L, Tan J Q, Zheng L J, et al. Evaluating gas generation and preservation of the Wufeng-Longmaxi Formation shale in Southeastern Sichuan Basin, China: implications from semiclosed hydrous pyrolysis[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 129:105102.
- [17] 罗涛,何治亮,郭小文,等.川东南丁山地区石牛栏组成脉流体来源与油气成藏[J].地质科技通报,2021,40(5):231-241.
Luo Tao, He Zhiliang, Guo Xiaowen, et al. Origin of vein forming fluid and hydrocarbon accumulation in Shiniulan Formation, Dingshan, Southeast Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021,40(5):231-241.
- [18] 白壮壮,杨威,李堃宇,等.川东南地区下志留统石牛栏组岩相古地理及生物礁滩发育特征[J].天然气地球科学,2023,34(1):35-50.
Bai Zhuangzhuang, Yang Wei, Li Kunyu, et al. Lithofacies palaeogeography and development characteristics of reef shoal in Lower Silurian Shiniulan Formation in Southeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023,34(1):35-50.
- [19] 张本健,周刚,钟原,等.川南地区志留系石牛栏组古地貌格局及沉积演化特征[J].古地理学报,2025,27(3):1-19.
Zhang Benjian, Zhou Gang, Zhong Yuan, et al. Palaeogeographic pattern and sedimentary evolution of the Silurian Shiniulan Formation in Southern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2025,27(3):1-19.
- [20] 谭先锋,李志军,蒋艳霞,等.渝东南地区下志留统石牛栏组生物礁沉积特征[J].石油与天然气地质,2014,35(1):56-64.
Tan Xianfeng, Li Zhijun, Jiang Yanxia, et al. Sedimentary characteristics of bioherm in the Lower Silurian Shiniulan Fm, Southeastern Chongqing[J]. Oil & Gas Geology, 2014,35(1):56-64.
- [21] 王鲲.川东南地区志留系石牛栏组沉积相与成岩作用研究[D].成都:成都理工大学,2016:40-52.
Wang Kun. Facies and diagenesis of Shiniulan Formation in southeast area of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016:40-52.
- [22] 王海军,孟宪武,梁子锐,等.川东南志留系石牛栏组生物礁特征与勘探方向[J].中国石油勘探,2016,21(5):33-41.
Wang Haijun, Meng Xianwu, Liang Zirui, et al. Organic reef characteristics and exploration orientation of Silurian Shiniulan Formation, Southeastern Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(5):33-41.
- [23] 周永胜,吴伟,冯建伟,等.致密碳酸盐岩气藏裂缝预测及主控因素分析:以四川盆地G气田震旦系灯影组为例[J].东北石油大学学报,2024,48(2):102-115.
Zhou Yongsheng, Wu Wei, Feng Jianwei, et al. Fracture prediction and main controlling factors analysis of tight carbonate gas reser-

- voir: take the Sinian Dengying Formation of G Gas Field in Sichuan Basin as an example[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(2):102-115.
- [24] Wang P, Tan X F, Chen H, et al. Sedimentary characteristics, formation mechanisms and geological significance of the Shiniulan Formation reefs(Lower Silurian) in the Upper Yangtze Platform[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2019,66(4):567-588.
- [25] 邹才能,杨智,孙莎莎,等.“进源找油”:论四川盆地页岩油气[J]. *中国科学:地球科学*,2020,50(7):903-920.
Zou Caineng, Yang Zhi, Sun Shasha, et al. “Exploring petroleum inside source kitchen”: shale oil and gas in Sichuan Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020,50(7):903-920.
- [26] 侯明才,陈洪德,陈安清. 江南—雪峰隆起对川东南—黔南凹陷石牛栏期沉积古地理的制约[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2010,37(4):395-400.
Hou Mingcai, Chen Hongde, Chen Anqing. Constraints of the Jiangnan-Xuefeng Upheaval to the depositional system and paleogeography distribution of Southeast Sichuan-South Guizhou Depression during Shiniulan Period[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2010,37(4):395-400.
- [27] 何登发,李德生,张国伟,等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *地质科学*,2011,46(3):589-606.
He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011,46(3):589-606.
- [28] 颜宇豪,陈安清,张本健,等. 四川盆地奥陶纪沉积体系演化与古地理格局重建[J]. *沉积与特提斯地质*,2024,44(3):600-612.
Yan Yuhao, Chen Anqing, Zhang Benjian, et al. Evolution of the Ordovician sedimentary system and paleogeographic reconstruction in the Sichuan Basin, China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2024,44(3):600-612.
- [29] 王学军,杨志如,韩冰. 四川盆地叠合演化与油气聚集[J]. *地学前缘*,2015,22(3):161-173.
Wang Xuejun, Yang Zhiru, Han Bing. Superposed evolution of Sichuan Basin and its petroleum accumulation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015,22(3):161-173.
- [30] 段美铃,宋昊,胡伟,等. 川北韩家店组页岩风化过程的矿物学与元素地球化学研究[J]. *地球科学进展*,2022,37(6):641-659.
Duan Meiling, Song Hao, Hu Wei, et al. Mineral and element geochemical characteristics of shale weathering in Hanchiatien Formation, North Sichuan[J]. *Advances in Earth Science*, 2022,37(6):641-659.
- [31] 戎嘉余,陈旭,王怿,等. 奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁:证据与启示[J]. *中国科学:地球科学*,2011,41(10):1407-1415.
Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, et al. Northward expansion of Central Guizhou oldland through the Ordovician and Silurian transition: evidence and implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011,41(10):1407-1415.
- [32] 陈维铭,万翠蓉,李悦,等. 渝西大足区块早志留世陆架微地貌对深层页岩气沉积—储层的影响[J]. *东北石油大学学报*,2024,48(6):49-68.
Chen Weiming, Wan Cuirong, Li Yue, et al. Influence of Early Silurian intra-shelf micro-geomorphology on sedimentation and reservoir of deep shale gas in the Dazu Area, Western Chongqing[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(6):49-68.
- [33] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications[J]. *Precambrian Research*, 1995,73(1/2/3/4):27-49.
- [34] Charreau J, Kent-Corson M L, Barrier L, et al. A high-resolution stable isotopic record from the Junggar Basin(NW China): implications for the paleotopographic evolution of the Tianshan Mountains[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012,341:158-169.
- [35] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs: geo-chemical techniques for evaluating origin and distribution[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993:262-263.
- [36] Banner J L, Wasserburg G J, Chen J H, et al. Uranium-series evidence on diagenesis and hydrology in Pleistocene carbonates of Barbados, West Indies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991,108(4):307-308.
- [37] Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993,120(3/4):409-430.
- [38] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964,28(10/11):1787-1816.
- [39] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. *沉积学报*,1985,3(4):17-30.
Zhang Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985,3(4):17-30.
- [40] Caeano-Filho S, Paula-Santos G M, Dias-Brito D. Carbonate REE+Y signatures from the restricted early marine phase of South Atlantic Ocean(Late Aptian-Albian): the influence of early anoxic diagenesis on shale-normalized REE+Y patterns of ancient carbonate rocks[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018,500(1):69-83.
- [41] 李峰峰,李蕾,余义常. 伊拉克 X 油田巨厚生物碎屑灰岩储层强非均质性 & 主控因素[J]. *东北石油大学学报*,2023,47(1):84-95.
Li Fengfeng, Li Lei, Yu Yichang. Reservoir intense heterogeneity and main controlling factors of thick bioclastic limestone in X Oilfield, Iraq[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023,47(1):84-95.

- [42] Liang T, Jones B. Characteristics of primary rare earth elements and yttrium in carbonate rocks from the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation, North China: implications for the depositional system[J]. *Sedimentary Geology*, 2021,415:105864.
- [43] 肖钦仁,袁海锋,湛辰,等.川中北部地区茅口组白云岩成因分析—来自岩石学、原位地球化学及年代学证据[J].*天然气地球科学*, 2024,35(7):1160-1186.
Xiao Qinren, Yuan Haifeng, Shen Chen, et al. Analysis of dolomite genesis in the Maokou Formation, northern slope area of Central Sichuan, China: petrologic, in situ geochemical, and chronological evidence[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024,35(7):1160-1186.
- [44] Haley B A, Klinkhammer G P, Mcmanus J. Rare earth elements in pore waters of marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004,68(6):1265-1279.
- [45] Deng L, Hu C L, Li X, et al. Diagenetic evolution in marine carbonate rocks based on the typical case studies: review and perspectives[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2025,176:107352.
- [46] Elderfield H, Upstill-Goddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990,54(4):971-991.
- [47] Lan C Y, Long X P. Redox-stratified seawater during the GOE: evidences from rare earth elemental and C-O isotopic compositions of Paleoproterozoic BIF and carbonate rocks from the Taihua Group, North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 157:105424.
- [48] 赵彦彦,李三忠,李达,等.碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J].*大地构造与成矿学*,2019,43(1):141-167.
Zhao Yanyan, Li Sanzhong, Li Da, et al. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019,43(1):141-167.
- [49] Walton C R, Shorttle O. Phanerozoic biological reworking of the continental carbonate rock reservoir[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024,632:118640.
- [50] Chen J B, Aigeo T J, Zhao L S, et al. Diagenetic uptake of rare earth elements by bioapatite, with an example from Lower Triassic conodonts of South China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015,149:181-202.
- [51] 孙斌,张培先,高全芳,等.川东南南川地区茅口组一段碳酸盐岩储层特征及富集模式[J].*非常规油气*,2022,9(3):21-31.
Sun Bin, Zhang Peixian, Gao Quanfang, et al. Reservoir properties and accumulation mode of carbonate rocks in Mao 1 Member of Nanchuan Area in Southeast Sichuan[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022,9(3):21-31.
- [52] 李文杰,施泽进,胡东风,等.四川盆地东南部下奥陶统桐梓组白云岩储层特征与成因机制[J].*天然气工业*,2024,44(12):34-49.
Li Wenjie, Shi Zejin, Hu Dongfeng, et al. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of the Lower Ordovician Tongzi Formation dolostone in the Southeastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024,44(12):34-49.
- [53] Rao C P. Geochemical differences between subtropical(Ordovician), cool temperate(Recent and Pleistocene) and subpolar(Permian) carbonates, Tasmania, Australia[J]. *Carbonates and Evaporites*, 1991,6:83-106.
- [54] Della Porta G, Webb G E, Mcdonald I. REEs patterns of microbial carbonate and cements from Sinemurian(Lower Jurassic) siliceous sponge mounds(Djebel Bou Dahar, High Atlas, Morocco)[J]. *Chemical Geology*, 2015,400:65-86.
- [55] 沈安江,胡安平,乔占峰,等.深—超深层碳酸盐岩储层发育与保持机理[J].*中国科学:地球科学*,2024,54(11):3403-3420.
Shen Anjiang, Hu Anping, Qiao Zhanfeng, et al. Development and preservation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024,54(11):3403-3420.
- [56] 高兆龙,彭瀚霖,张玺华,等.川中地区茅二段白云石化作用机制及分布模式[J].*海相油气地质*,2024,29(4):372-384.
Gao Zhaolong, Peng Hanlin, Zhang Xihua, et al. The mechanism and distribution model of dolomitization in the 2nd member of Maokou Formation in Central Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2024,29(4):372-384.
- [57] 郑开兵,刘建峰.塔里木盆地奥陶系层间岩溶野外剖面及岩溶特征[J].*石油化工高等学校学报*,2020,33(3):53-59.
Zheng Kaibing, Liu Jianfeng. Ordovician interlayer karst field profiles and karst characteristics in Tarim Basin[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2020,33(3):53-59.
- [58] 李海波,朱巨义,郭和坤.核磁共振 T_2 谱换算孔隙半径分布方法研究[J].*波谱学杂志*,2008,25(2):273-280.
Li Haibo, Zhu Juyi, Guo Hekun. Methods for calculating pore radius distribution in rock from NMR T_2 spectra[J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2008,25(2):273-280.
- [59] 李志清,孙洋,胡瑞林,等.基于核磁共振法的页岩纳米孔隙结构特征研究[J].*工程地质学报*,2018,26(3):758-766.
Li Zhiqing, Sun Yang, Hu Ruilin, et al. Quantitative analysis for nanopore structure characteristics of shales using NMR and NMR cryoporometry[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018,26(3):758-766.
- [60] 邹瑞,王璐,罗瑞兰,等.深层碳酸盐岩气藏不同类型储层全尺寸孔径分布及其分形特征:以四川盆地高磨地区震旦系灯四段为例[J].*中国矿业大学学报*,2024,53(6):1218-1236.
Zou Rui, Wang Lu, Luo Ruilan, et al. Full-size pore throat radius distribution and fractal characteristics of different types of reservoirs in deep carbonate gas reservoirs: a case study of Deng 4 Member in Gaoshiti-Moxi Area, Sichuan Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024,53(6):1218-1236.

- [61] 黄金叶,张英杰,王强,等. 碳酸盐岩沉积微相特征及储层控制因素:以塔河油田东南缘 X 井中—上奥陶统为例[J]. 东北石油大学学报,2024,48(2):42-58.
Huang Jinye, Zhang Yingjie, Wang Qiang, et al. Characteristics and control factors on favorable reservoirs of carbonate sedimentary microfacies: a case study of Middle-Upper Ordovician in well X, southeastern margin of Tahe Oilfield[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(2):42-58.
- [62] 王瑞,余克服,王英辉,等. 珊瑚礁的成岩作用[J]. 地球科学进展,2017,32(3):221-233.
Wang Rui, Yu Kefu, Wang Yinghui, et al. The diagenesis of coral reefs[J]. Advances in Earth Science, 2017,32(3):221-233.
- [63] Gardner K, Dorsey R J. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation at the margin of a Late Miocene tidal strait, Lower Colorado River Valley, South-Western USA[J]. Sedimentology, 2021,68(5):1893-1922.
- [64] 黄思静,佟宏鹏,黄可可,等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩成岩作用和白云岩成因的研究现状和存在问题[J]. 地球科学进展,2007,22(5):495-503.
Huang Sijing, Tong Hongpeng, Huang Keke, et al. The diagenesis and dolomitization of the Feixianguan carbonates of Triassic in NE Sichuan Basin: an overview[J]. Advances in Earth Science, 2007,22(5):495-503.
- [64] 张浩然,姜华,陈志勇,等. 四川盆地及周缘地区加里东运动幕次研究现状综述[J]. 地质科技通报,2020,39(5):118-126.
Zhang Haoran, Jiang Hua, Chen Zhiyong, et al. A review of the research status of Caledonian movement stages in Sichuan Basin and surrounding areas[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020,39(5):118-126.

.....
(上接第 78 页)

- [35] 刘建平,鲜本忠,张莉,等. 渤海湾盆地东营凹陷碎屑流主控型深水体系沉积过程及模式[J]. 中国地质,2022,49(6):1951-1969.
Liu Jianping, Xian Benzong, Zhang Li, et al. Depositional process and model of debrite dominated deep-water system in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geology in China, 2022,49(6):1951-1969.
- [36] 范洪军,王夏斌,陈飞,等. 湖相重力流沉积主控因素与分类方案研究进展[J]. 石油科学通报,2024,9(2):167-182.
Fan Hongjun, Wang Xiabin, Chen Fei, et al. Research progress on main controlling factors and classification schemes of lacustrine gravity flow deposits[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024,9(2):167-182.
- [37] 鲜本忠,王璐,刘建平,等. 东营凹陷东部始新世三角洲供给型重力流沉积特征与模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):10-21.
Xian Benzong, Wang Lu, Liu Jianping, et al. Sedimentary characteristics and model of delta-fed turbidites in Eocene Eastern Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016,40(5):10-21.
- [38] 杨田,操应长,田景春. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. 沉积学报,2021,39(1):88-111.
Yang Tian, Cao Yingchang, Tian Jingchun. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021,39(1):88-111.
- [39] 金杰华,操应长,王健,等. 深水砂质碎屑流沉积:概念、沉积过程与沉积特征[J]. 地质论评,2019,65(3):689-702.
Jin Jiehua, Cao Yingchang, Wang Jian, et al. Deep-water sandy debris flow deposits: concepts, sedimentary processes and characteristics[J]. Geological Review, 2019,65(3):689-702.