

引用格式: 白雪晶, 刘云苗, 洪淑新, 等. 2026. 川中合川—潼南地区二叠系茅口组二段白云石化作用及成储机制[J]. 沉积学报, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.019
BAI XueJing, LIU YunMiao, HONG ShuXin, et al. 2026. Mechanism of Dolomitization and Reservoirs in the Second Member of Permian Maokou Formation in Hechuan-Tongnan Block, Central Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.019
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.019 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.019

川中合川—潼南地区二叠系茅口组二段白云石化作用及成储机制

白雪晶^{1,2}, 刘云苗^{1,2}, 洪淑新^{1,2}, 于信晨^{1,2}, 赵威¹, 师江波^{1,2}, 刘连杰^{1,2}, 卢曦^{1,2}, 葛志丹¹, 张波¹

1. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室大庆油田研究分室, 黑龙江大庆 163712

2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712

摘要 【目的】四川盆地中部合川—潼南区块二叠系茅口组二段白云岩层段钻获多口高产井, 勘探前景大, 但储层特征及成因不明制约有利储层预测。【方法】基于岩心、薄片观察, 结合碳氧同位素、稀土元素及碳酸盐 U-Pb 定年等手段, 对该段白云岩成因及储层主控因素开展系统研究。【结果】区内茅二段主要发育含生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、白云质灰岩、晶粒白云岩四种岩石类型, 其中晶粒白云岩为主要储集岩; 储集空间以溶蚀孔洞为主, 含晶间溶孔与溶蚀缝。茅二段白云岩形成于准同生—浅埋藏期, 早期基质白云石和晚期鞍状白云石形成时间分别为 262 ± 16 Ma、 259.1 ± 4.7 Ma, 由滩间局限环境内的高 Mg/Ca 比海水渗透回流至多孔滩相沉积物中引发白云石化而成。【结论】储层受沉积相、早期白云石化作用和与构造裂缝作用相关的埋藏热液溶蚀作用控制, 古地貌高部位的高能颗粒滩相是储层发育的物质基础; 准同生—浅埋藏期白云石化作用为早期孔隙的继承和中深埋藏期的改造创造了条件; 与峨眉地裂运动相关的热液溶蚀作用导致非均质溶蚀孔洞发育, 是储层形成的关键。

关键词 四川盆地; 二叠系; 茅口组; 白云石化作用; 成储机制

第一作者 白雪晶, 女, 1987 年出生, 硕士, 高级工程师, 储层特征评价, E-mail: bxuejing@petrochina.com.cn

中图分类号: P588.24⁺5 P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550 (2026) 00-0000-00

0 引言

全球 60% 以上的油气产量源自碳酸盐岩, 且半数以上产自白云岩储层(刘媛媛等, 2024); 四川盆地碳酸盐岩气田 90% 以上的天然气储量也富集于白云岩储层(赵文智等, 2014), 该类储层在区域油气开发中地位关键, 长期受行业关注。四川盆地中二叠统碳酸盐层系油气勘探近年来获重大突破, 发现了多个大一中型气田。近年来川中地区 HS4 井、TS11 井等茅二段钻遇薄层白云岩储层并获高产(王伟等, 2022), 展示出良好的勘探前景。相较于石灰岩与过渡型储层, 白云岩储层因晶体结构致密, 抗压实能力更突出; 且易受多期溶蚀形成溶蚀孔、溶洞及溶缝, 孔隙网络受成岩改造干扰小, 连通性够长期保持稳定, 支撑单井产能持续稳定。同时, 白云岩储层多形成于古地貌构造高部位, 易大面积连片发育, 进而形成规模

性高产富集区。因此,白云岩储层成因研究成为学者的研究重点,在实验分析结合模拟实验剖析白云岩成因(李开等,2018)、岩石地球化学与年代学结合探讨白云岩储层成岩改造方面进展明显(沈安江等,2021),白云石化流体来源—作用方式及对白云岩岩体形态及分布的控制等亦引发广泛讨论(Nader *et al.*, 2017; Koeshidayatullah *et al.*, 2021)。此外,深层古老碳酸盐岩储层受成岩流体蚀变强烈,白云岩岩石地球化学及流体作用示踪剖析(郑剑锋等,2021)、幕式热液流体对储层的改造作用(冯明友等,2024)等尚需重新审视。随着研究深入,岩石学—成因矿物学约束下的构造—流体耦合作用研究、岩溶作用叠加后期多期流体对白云岩的影响研究(冯明友等,2023; Shang *et al.*, 2023)亦逐渐开展。这些后期流体对储层的改造作用直接影响了储层的物性和储集空间的展布,早期研究多认为后期流体以破坏性改造作用为主,即晚期热液流体携带矿物充填孔隙裂缝,缩减储集空间、降低渗透性。近年来则更加强调复合改造效应,认为后期流体兼具建设性与破坏性的改造作用,对储层的影响程度与流体性质和作用强度相关。例如:冯明友等(2023)提出低温淡水流体叠加岩溶作用可溶蚀形成新孔洞,提升储集性能,是对储层的建设性改造作用;Shang *et al.*(2023)则发现高温富盐流体易致白云岩交代生成胶结物,堵塞通道,是对储层的破坏性改造作用,且构造活动强的区域,流体作用双重性更显著。

四川盆地二叠系具有特殊的构造—沉积背景,东吴运动引发的区域抬升、玄武岩喷发等火山活动交织,塑造了差异化储层发育环境(姜自然等,2014)。目前盆内部分区域成储与成藏机制已明晰:川西北和川中—川东地区,震旦系—寒武系、二叠系深层孔隙型碳酸盐岩储层,受“裂陷—坳陷”旋回与沉积相控制,发育下生上储等3类成藏组合;川东—蜀南地区,茅口组一段泥灰岩非常规储层,源储一体成藏,受区域沉积环境、构造运动影响;川中地区,雷三段二段泥灰岩源储一体成藏,加里东期古隆起周缘颗粒滩叠合岩溶形成孔隙型白云岩储层(谢武仁等,2024);川西、川东北前陆区,裂隆耦合控制成藏,裂陷槽控烃源岩,坡折带控礁滩体,多期岩溶叠加形成缝洞储层(刘树根等,2016)。需注意,白云石化成因目前尚存争议,前人主要提出渗透回流(陈轩等,2012)、热液交代(潘立银等,2022)、微生物介导(刘邓,2024)等成因观点。四川盆地二叠纪白云岩均以栖霞—茅口期高能滩相颗粒灰岩为物质基础(田景春等,2014;苏旺等,2015;何溥为等,2021;朱茂等,2022),普遍经历多期白云岩化与溶蚀作用叠加改造(刘建强等,2017;芦飞凡,2021;肖钦仁等,2024),且白云岩优先发育于古地貌高部位(郑剑锋等,2021;何江等,2024),其早期演化阶段均有海水—大气淡水混合流体参与(金振奎和冯增昭,1999;徐婷等,2024)。其区带差异方面,川东/川南地区以热液交代为主导且断裂控因强(陈轩等,2012;李让彬等,

2021)；川西地区为玄武岩淋滤白云化(金振奎和冯增昭, 1999)；川北地区则表现为埋藏白云化叠加弱热液改造的特征(杨朝屹等, 2026)。而川中合川—潼南地区茅口组二段研究起步较晚, 目前主要集中在沉积环境(胡明毅等, 2012)、岩溶古地貌(钟原等, 2021)、储渗空间类型与成因(刘建强等, 2017; 胡东风等, 2019)及天然气富集规律(沈平等, 2015)方面, 对储层成因及主控因素认识尚不明晰。核心争议点集中于三方面: (1)白云石化成因, 究竟以热液白云石化为主, 还是准同生期埋藏白云石化为主存在分歧; (2)构造—热液作用影响, 峨眉地幔柱(罗志立等, 2012)、热液流体改造(王良军等, 2022)在区内的具体响应尚不明确; (3)优质储层主控因素, 储层发育受沉积相(如颗粒滩展布)控制还是断裂主导。上述问题目前尚未形成共识, 严重制约优质储层分布预测。

本次以合川—潼南地区茅口组二段白云岩储层为研究对象, 以岩心观察、薄片鉴定等矿物—岩石学分析为基础, 结合元素/同位素及碳酸盐原位 U-Pb 定年等分析测试手段, 明确白云石化成因, 探讨其与优质储层的关系, 为下一步深层复杂碳酸盐岩油气勘探提供理论依据。

1 地质概况

合川—潼南地区位于川中低缓褶皱构造区, 西靠高石梯—磨溪(高磨)构造、北邻广安构造、东抵川东高陡构造带(图1a), 长期处于古隆起翼部, 二叠系现今构造整体表现为南高北低的斜坡、局部构造不发育(图1b)。该区断裂属川东高陡褶皱带延伸区, 主发育NE向、NW向深大断裂。受南北向拉张应力影响, 区域呈“南台地、北裂陷”地貌, 断裂既控构造格局, 又为热液活动提供通道, 从而改造白云岩储层。茅二段白云岩宏观特征显示, 多为深灰—黑灰色云岩; 野外及岩心可见两类产状, 即灰黑色层状/块状白云岩(含深浅交织斑块)和花斑状灰质白云岩/白云质灰岩(暗色斑块切割或岩溶分隔时呈角砾化)。储层主要发育于茅二段中部, 横向稳定; 古地貌高部位单层厚超10 m且叠置连片, 低洼处变薄甚至尖灭; 整体发育面积约1 250 km², 集中于矿权区中东部, 与古地貌高隆起带吻合, 高能颗粒滩相为白云岩形成提供物质基础。四川盆地二叠系地层(图1c)自下而上主要包括下二叠统梁山组、栖霞组, 中二叠统茅口组、龙潭组(部分区域含峨眉山玄武岩组)。沉积演化具阶段性, 下二叠统从碎屑岩沉积为主过渡到碳酸盐岩沉积为主; 中二叠统盆内广泛海侵, 沉积小于15 m的梁山组滨岸沼泽相含煤碎屑岩沉积(与下伏地层呈不整合接触)(黄涵宇等, 2017)。栖霞组沉积期先快速海侵、后缓慢海退, 受川中古隆起残余地貌控制发育浅缓坡碳酸盐岩; 茅口组继承栖霞期海侵面貌, 发育浅水开阔台地相碳酸盐沉积; 茅口组末期地层抬

升剥蚀，与上覆龙潭组平行不整合接触。

研究区茅口组总体为薄层至块状的灰—深灰色泥晶灰岩及亮晶生屑灰岩，含有孔虫、绿藻、珊瑚及腕足等生物。其中，茅一段主要发育泥灰岩、生屑泥晶灰岩及泥晶生屑灰岩；茅二段厚 64~95 m，沉积期高位体系域时期具备发育浅水台内中高能滩的沉积背景（朱茂等，2022），其中，白云岩储层主要发育在茅二下段的中上部，岩性主要为晶粒白云岩、云质含量较高的含灰云岩和含云灰岩，少量发育于茅二上段的中部，均属于高频旋回顶部，储层厚 2~22 m，且横向稳定分布，具有一定的连续性，自研究区北东（TS22、TS18 井）、南西两侧向中部地区及靠近古地貌高部位（HS4、TS4、TS11 井）具有单层厚度增大的趋势（图 2）；茅三段发育灰色亮晶生屑灰岩；区内茅四段剥蚀殆尽，主要发育深灰色含生屑泥晶灰岩。

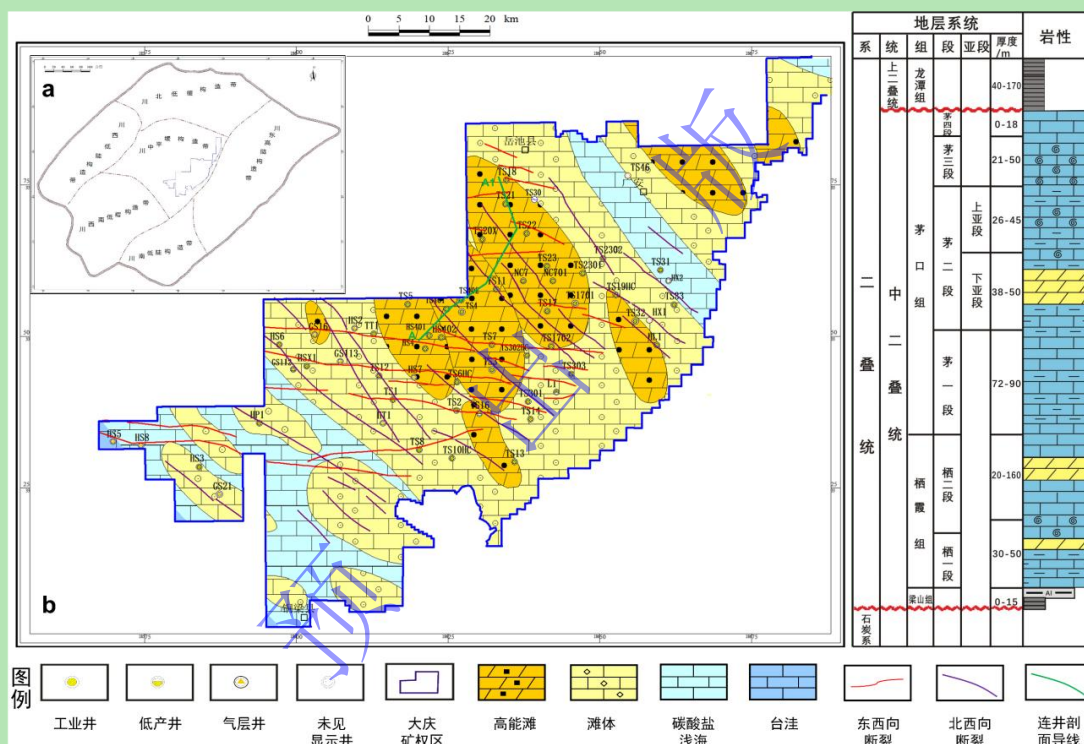


图 1 研究区构造位置图及地层综合柱状图

(a) 研究区域的构造位置；(b) 研究区沉积相图及区内井位分布；(c) 中二叠统茅口组综合柱状图

Fig.1 Location and strata column of Permian Qixia-Maokou Formation in the central Sichuan Basin

(a) the tectonic location of the study area; (b) sedimentary facies map and well distribution in the study area; (c) composite stratigraphic column of the middle Permian Maokou Formation

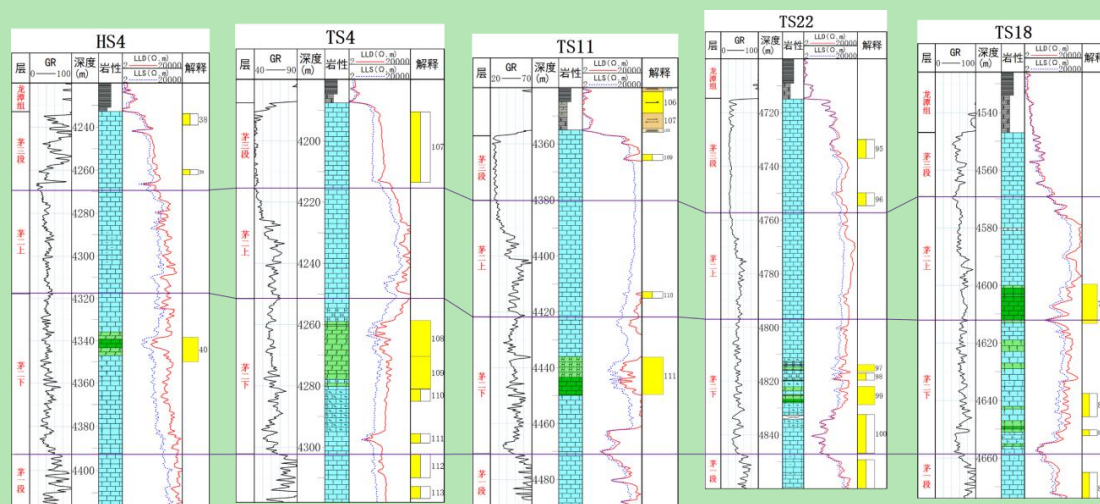


图2 研究区连井剖面图

Fig.2 Cross section diagram of connected wells in the research area

2 样品及分析

样品均采自合川—潼南区块 TS3、TS4、HS4、HS402 井岩心，共计样品 644 件。采样点均完成薄片分析，共计 374 件，薄片经茜素红染色后，方解石呈红色、白云石不着色；其中，普通薄片 136 件、铸体薄片 238 件，铸体薄片采用蓝色液态胶充注，从而观察孔隙类型。部分典型储层样品开展物性（孔隙度、渗透率）分析 237 件。基于岩心及显微镜下观察结果优选地球化学分析样品，选取典型灰岩、白云岩基质及充填物开展微区碳氧同位素分析 15 件、稀土—微量元素测试分析 14 件；对白云岩基质及鞍状白云石胶结物开展 U-Pb 同位素年龄分析 4 件。

碳氧稳定同位素分析由杭州地质研究院碳酸盐岩储层重点实验室和大庆油田研究分室共同完成。其中，12 件由碳酸盐岩储层重点实验室大庆油田研究分室完成，取岩样研磨至 0.090 mm 以下，取 5~20 mg 样品进行检测，采用德国 Elementar 生产的稳定同位素质谱仪 Isoprime 100，测试过程中采用 GBW04405 和 GBW04406 标样， $\delta^{13}\text{C}$ 检测精度 $\pm 0.2\%$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 检测精度 $\pm 0.3\%$ 。3 件激光原位碳氧稳定同位素分析和 4 件激光原位 U-Pb 同位素年龄分析均于杭州地质研究院碳酸盐岩储层重点实验室完成。3 件激光原位碳氧稳定同位素分析，采用 Delta V Advantage 同位素质谱仪，激光剥蚀系统为 Nd:YAG（钕铝石榴石晶体）激光器，标样同样使用 GBW04405 和 GBW04406 标样， $\delta^{13}\text{C}$ 测试精度 $\pm 0.06\%$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 测试精度 $\pm 0.08\%$ 。U-Pb 同位素年龄分析采用 ASI RESOLUTION SE 激光剥蚀系统完成样品分析，该系统由澳大利亚科学仪器公司生产，包括 193 nm 的 ArF 准分子激光器和 Laurin Technic 双室样品室，年代测仪器为 Nu Plasma II MC-ICPMS，标样选取具有高稳定性且适合古老海相碳酸盐岩定年

的 AHX-1 样品。稀土—微量元素 (14 件) 测试分析于中国贵州同微测试科技有限公司完成, 采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICPMS), 使用 W-2a 和 BHVO-2 作为标样, 仪器检测精度 $\pm 5\%$ 。稀土元素含量采用后太古代澳大利亚平均页岩 (Post-Archean Australian Average Shale, PAAS) 标样值进行标准化处理。237 件岩石样品的孔隙度和渗透率分析由大庆油田研究分室和成都理工大学共同完成。其中, 90 件灰岩、117 件白云岩 2.5 cm 柱塞样品由碳酸盐岩储层重点实验室大庆油田研究分室完成, 采用法国 Vinci 生产的氦孔隙度仪, 该仪器孔隙度检测范围为 0~40%, 测量压力为 1.4~1.6 MPa, 围压范围为 3.5~70.0 MPa。7 件灰岩、23 件白云岩 10 cm 全直径样品由成都理工大学完成, 采用稳态法渗透率测定仪, 该仪器渗透率检测范围为 $(0.001\sim 8\ 000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 测量压力为 0.02~0.8 MPa, 围压范围为 1.5~2.8 MPa。

3 结果

3.1 岩石学特征

岩心 (图 3a~h) 及薄片 (图 4a~f) 分析表明, 研究区内茅二段主要发育含生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、白云质灰岩、晶粒白云岩四种岩石类型, 以晶粒白云岩为主要储集岩。

含生屑泥晶灰岩以深灰色为主, 局部夹灰黑色泥质纹层, 镜下生物碎屑含量较少 (多小于 20%)、生屑大小不一 (图 4a), 主要由介壳类、腕足类等生物碎屑构成。岩性整体致密, 局部见缝合线。泥晶生屑灰岩 (图 3a) 多为深灰色、含较多生物, 镜下生屑占比超 50%, 以有孔虫、腕足类、腹足类为主, 见少量海百合茎、藻类及苔藓虫等 (图 4b)。白云质灰岩多呈深灰色、发育在白云岩储层顶/底部, 白云石与方解石具有较清晰界线, 并呈斑块状/窄条带状展布 (图 3b), 见未被云化的方解石及生物扰动痕迹 (图 3c), 其中云化部分晶体自形程度较好, 多为细晶结构 (图 4c)。晶粒白云岩多呈灰色, 针状孔发育 (图 3e)。显微镜下晶粒白云岩以细晶、粉晶为主 (图 4d), 少量为粗—中晶白云岩, 晶形边界弯曲、表面污浊, 呈镶嵌状排列, 晶粒大小多为 0.10~0.25 mm、它形晶, 部分可见残余生物碎屑颗粒结构 (图 4e, f), 指示白云石化作用发生前原岩为生屑灰岩。除以上类型外, 在白云岩的溶蚀缝洞中多见白色鞍状白云石, 其沿裂缝充填或在孔洞中呈环边状胶结 (图 3d); 正交光下见波状消光, 阴极发光下呈亮红色并具环带结构 (图 4g~j)。

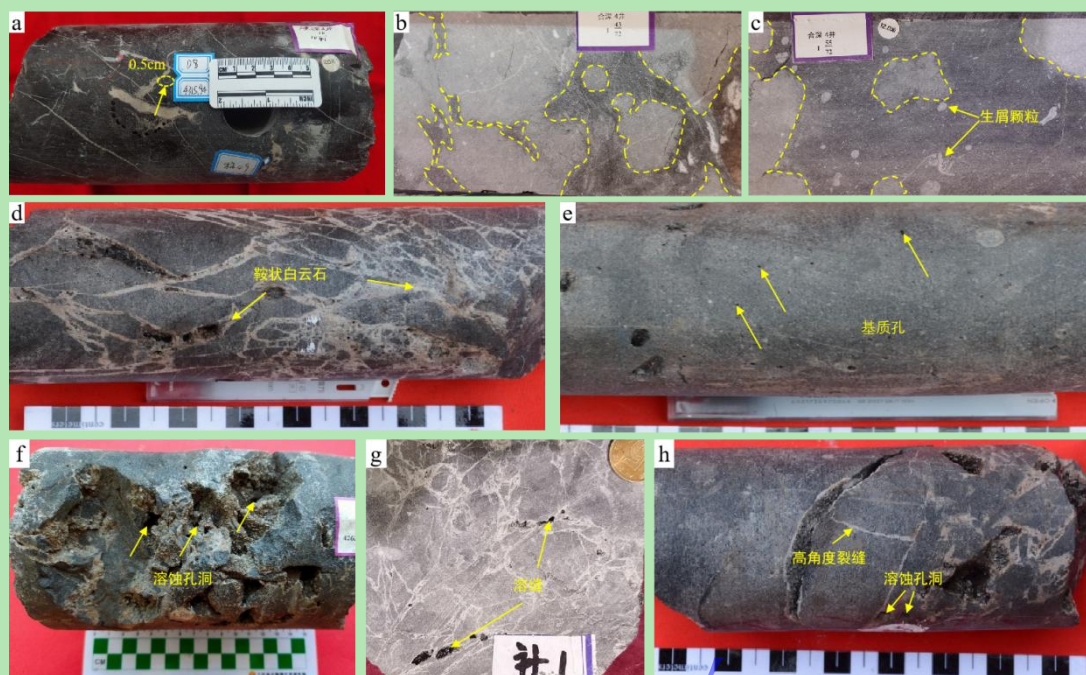


图3 研究区茅二段典型岩心特征

(a) TS3 井, 4 315.94 m, 泥晶生屑灰岩, 发育生物碎屑; (b) TS4 井, 4 267.10 m, 白云质灰岩; (c) HS4 井, 晶粒白云岩, 见方解石质生屑颗粒; (d) HS402 井, 4 644.60 m, 溶缝中充填鞍状白云石; (e) HS402 井, 4 645.55 m, 晶粒白云岩, 针状基质孔; (f) TS4 井, 4 267.35 m, 细晶白云岩, 发育溶蚀孔洞; (g) HS4 井, 细晶白云岩, 沿裂缝发育溶缝; (h) HS402 井, 4 648.80 m, 细晶白云岩, 发育高角度裂缝、溶蚀孔洞

Fig.3 Typical core characteristics in the Second member of Maokou Formation

(a) well TS3, 4 315.94 m, micritic bioclastic limestone, with bioclasts developed; (b) well TS4, 4 267.10 m, dolomitic limestone; (c) well HS4, crystalline dolomite, with calcareous bioclastic grains observed; (d) well HS402, 4 644.60 m, dissolution fractures filled with saddle dolomite; (e) well HS402, 4 645.55 m, crystalline dolomite, with acicular matrix pores; (f) well TS4, 4 267.35 m, fine-crystalline dolomite, with dissolution vugs developed; (g) well HS4, fine-crystalline dolomite, dissolution fractures developed along fractures; (h) well HS402, 4 648.80 m, fine-crystalline dolomite, with high-angle fractures and dissolution vugs developed

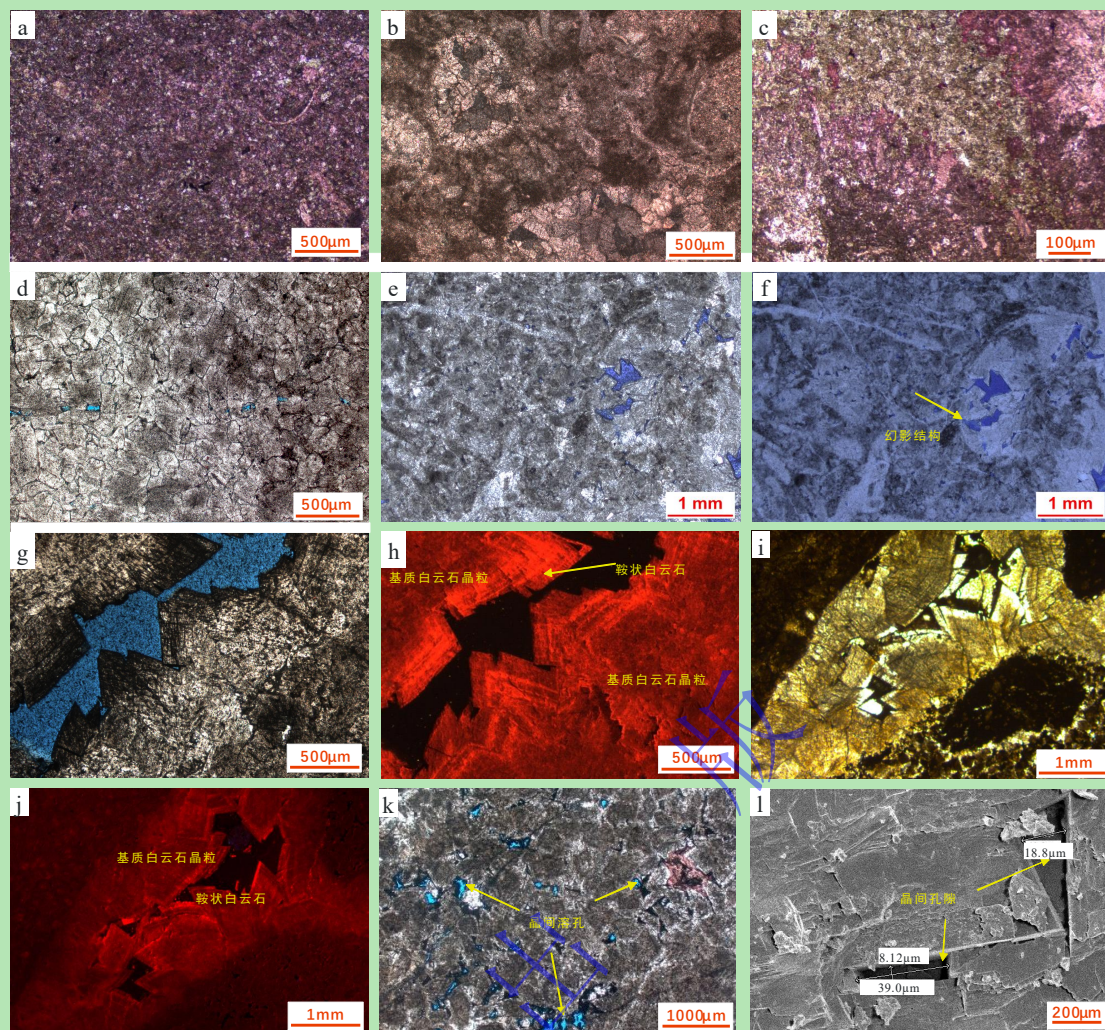


图4 研究区茅二段典型岩石类型及显微镜下特征

(a) HS4 井, 4 331.05 m, 含生屑泥晶灰岩, 单偏光; (b) TS3 井, 4 317.74 m, 泥晶生屑灰岩, 茜素红染色, 单偏光; (c) HS4 井, 4 334.50 m, 白云质灰岩, 白云石呈斑块状展布, 以细晶结构为主, 单偏光; (d) TS3 井, 4 305.20 m, 细晶白云岩, 单偏光; (e) TS4 井, 晶粒白云岩, 单偏光; (f) 与图 e 同视域, 以白纸遮挡光源减弱光线, 可见生屑颗粒的幻影结构; (g) TS4 井, 4 256.70 m, 细晶云岩, 裂缝中充填鞍状白云石, 残余部分孔隙, 单偏光; (h) 与图 j 同视域, 基质细晶白云石晶粒发暗红色光, 裂缝充填鞍状白云石发亮红色光, 具环带结构, 阴极发光; (i) TS4 井, 4 270.26 m, 细晶云岩, 鞍形白云石充填溶缝, 单偏光; (j) 与图 i 同视域, 基质细晶白云石晶粒发暗红色光, 裂缝充填鞍状白云石发亮红色光; (k) TS4 井, 4 258.00 m, 细晶云岩, 发育白云石晶间溶孔, 单偏光; (l) TS4 井, 4 277.27 m, 残余生屑细晶云岩, 晶间孔隙, 扫描电镜

Fig.4 Typical rock types and microscopic characteristics in the Second member of Maokou Formation

(a) well HS4, 4 331.05 m, bioclastic-bearing micritic limestone, plane-polarized light (PPL); (b) well TS3, 4 317.74 m, micritic bioclastic limestone, alizarin red staining, PPL; (c) well HS4, 4 334.50 m, dolomitic limestone, dolomite distributed in patches, dominated by fine-crystalline texture, PPL; (d) well TS3, 4 305.20 m, fine-crystalline dolomite, PPL; (e) well TS4, crystalline dolomite, PPL; (f) same field of view as Fig.e, light weakened by white paper, phantom structure of bioclastic grains visible; (g) well TS4, 4 256.70 m, fine-crystalline dolomite, saddle dolomite filled in fractures with residual pores, PPL; (h) same field of view as Fig.j, matrix fine-crystalline dolomite showing dark red luminescence, saddle dolomite in fractures showing bright red luminescence with zonal structure, cathodoluminescence (CL); (i) well TS4, 4 270.26 m, fine-crystalline dolomite, saddle dolomite filling dissolution fractures, PPL; (j) same field of view as Fig.i, matrix fine-crystalline dolomite showing dark red luminescence, saddle dolomite in fractures showing bright red luminescence; (k) well TS4, 4 258.00 m, fine-crystalline dolomite with intercrystalline dissolution pores, PPL; (l) well TS4, 4 277.27 m, relic bioclastic fine-crystalline dolomite with intercrystalline pores, Scanning Electron Microscopy (SEM)

3.2 储集空间特征

岩心（图 3a~h）及薄片（图 3a~g）观察表明，研究区茅二段储集空间类型分为晶间溶孔、溶蚀孔洞和溶蚀缝三类（图 3f~h），以溶蚀孔洞为主。

晶间溶孔较发育（图 4k），孔隙大小介于 10~100 μm ，孔壁弯曲，其形成多与晶间溶蚀扩大相关；扫描电镜（图 4l）及激光共聚焦（图 5a, b）可见以上晶间孔的孔径为 1~40 μm ，单个孔隙空间体积为 0.01~22 477 μm^3 ，占岩石总体积的 0.29%~0.47%，经溶蚀扩大后形成的晶间溶孔面孔率可达 10%。

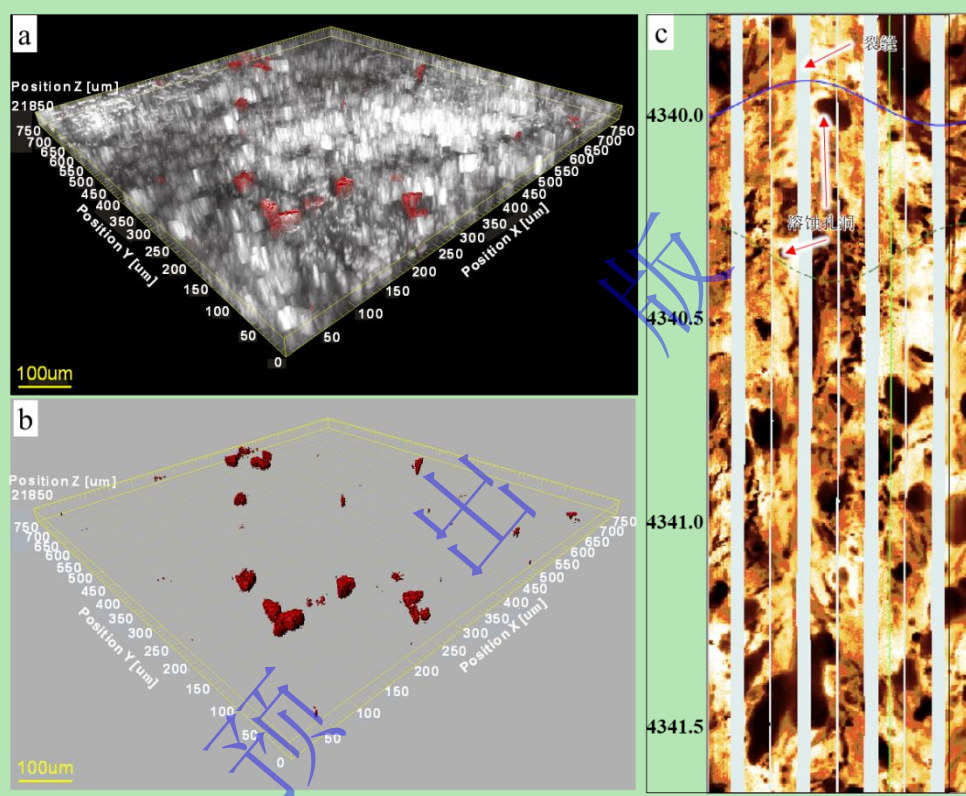


图 5 研究区茅二段储集空间类型宏观及微观特征

(a) TS4 井，4 272.70 m，细晶云岩，激光共聚焦分析晶间孔隙提取；(b) TS4 井，4 272.70 m，细晶云岩，激光共聚焦分析晶间孔隙 3D 模型，红色为提取孔隙模型；(c) HS4 井，4 339.50~4 342.00 m 段成像测井图，发育溶蚀孔洞

Fig.5 Macrophotos and microphotos of reservoir space in the Second member of the Maokou Formation

(a) well TS4, 4 272.70 m, fine-crystalline dolomite, intercrystalline pores extraction by laser confocal scanning microscopy; (b) well TS4, 4 272.70 m, fine-crystalline dolomite, 3D model of intercrystalline pores by laser confocal scanning microscopy, red represents extracted pore model; (c) well HS4, imaging log from 4 339.50-4 342.00 m, development of dissolution vugs

溶蚀孔洞主要发育在白云岩储层段，形状不规则或略呈圆形，直径 5~50 mm，长短轴差别较大。溶洞多为沿着基岩或岩溶系统（图 3e）内部的原始孔隙、裂缝持续扩溶形成，部分沿溶蚀孔洞环边胶结鞍状白云石（图 3f, h），表面见沥青或泥质充填；成像测井上（图 5c）可见斑状溶蚀孔洞特征，多数分布无规律，局部沿裂缝周围发育、少部分呈分散孤立状。此外，研究区白云岩储层可见呈网状、交织状或树枝状发育的溶缝（图 3g），缝壁弯曲无

固定延伸方向、宽窄不一（多为 2~20 mm），多由裂缝扩张溶蚀形成，局部溶缝被鞍状白云石充填一半充填（图 4g~j），半充填残余孔洞呈长形不规则状、直径为 2~8 mm，对储层具有一定贡献；成像测井上亦可见部分裂缝周缘的不规则溶缝（图 5c）。

3.3 物性特征

根据 HS4、TS4 等井茅二段全直径及柱塞样品分析结果，区内 179 件柱塞灰岩孔隙度为 0.1%~4.2%、渗透率为 $(0.003\sim 28) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，102 件柱塞白云岩孔隙度为 0.4%~5.5%、渗透率为 $(0.002\sim 85.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此外，区内 6 件全直径灰岩孔隙度为 0.4%~16.5%、渗透率为 $(0.001\sim 544.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，28 件全直径白云岩孔隙度为 0.4%~8.4%，渗透率为 $(0.07\sim 1535) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总体看来，白云岩较灰岩有更高的孔隙度和渗透率，部分全直径白云岩孔隙度大于 6%（图 6）。

通过对全直径灰岩、白云岩样品实测孔隙度进行统计，按不同孔隙度区间计算样品数量占总样品数的百分比，可得到全直径样品孔隙度频率分布；采用相同方法，对柱塞灰岩、白云岩样品的实测孔隙度分析，能获得柱塞样品孔隙度频率分布（图 7a）。同理，对全直径与柱塞样品的实测渗透率统计，可绘制渗透率分布图（图 7b）。

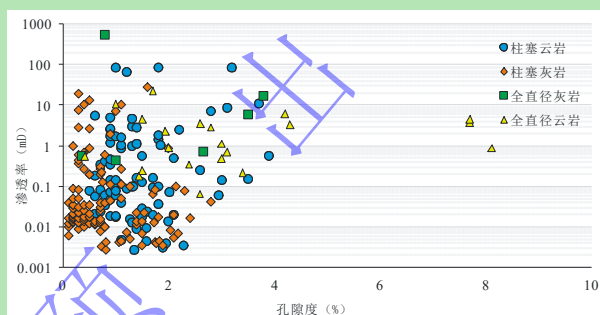


图 6 合川—潼南区块茅二段孔渗交会图

Fig.6 Crossplot of porosity and permeability in the Second member of Maokou Formation

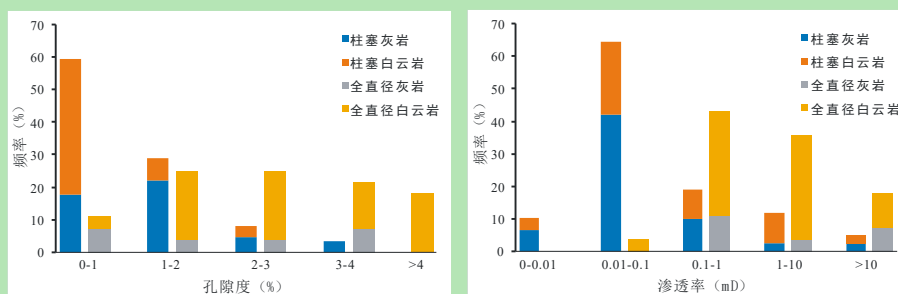


图 7 合川—潼南区块茅二段白云岩储层孔隙度、渗透率分析直方图

(a) 孔隙度频率分布直方图；(b) 渗透率频率分布直方图

Fig.7 Histograms of porosity and permeability in the Second member of Maokou Formation

(a) histogram of porosity frequency distribution; (b) histogram of permeability frequency distribution

结合频率分布直方图数据来看：灰岩样品物性整体较差，无论是柱塞样品还是全直径样

品，绝大部分孔隙度小于 2%，渗透率也小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；白云岩样品物性则呈现明显的样品类型差异：柱塞白云岩中，孔隙度分布在 0~2% 区间的占比达 69%，渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比为 55%；而全直径白云岩表现更优，孔隙度大于 2% 的占比高达 58%，渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比超过 54%。

总体而言，全直径白云岩的物性显著优于柱塞白云岩，这一差异的核心原因在于柱塞样品取样时会避开溶蚀孔洞，而全直径样品呈现的高孔渗特征，恰好反映出溶蚀孔洞是白云岩样品的主要孔隙类型，也印证了溶蚀孔洞对白云岩储层物性的关键贡献。

3.4 地球化学特征

3.4.1 碳氧稳定同位素

微区粉末及激光原位碳氧同位素分析表明（图 8a、表 1），灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 4.11‰~5.28‰（平均为 4.42‰），基质白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 3.60‰~4.33‰（平均为 4.01‰），鞍状白云石胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 为 3.38‰~4.43‰（平均为 3.88‰），三者 $\delta^{18}\text{O}$ 均在同时期二叠纪海水范围之内（2‰~6‰）。灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.52‰~-6.09‰（平均为 -6.98‰），处于正常海相灰岩氧同位素范围（-5‰~-8.2‰）内，与川北地区未受强热液改造的灰岩数据（平均为 -7.28‰）接近，无明显负偏，排除其受显著热液影响的可能；基质白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.76‰~-7.21‰（平均为 -8.09‰），鞍状白云石胶结物 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -8.50‰~-7.58‰（平均为 -7.99‰），二者 $\delta^{18}\text{O}$ 较灰岩及同时期二叠纪海水略偏负，但二者间无明显差异。这一特征暗示两期白云石可能经历了热分馏作用（陈轩等，2012）。

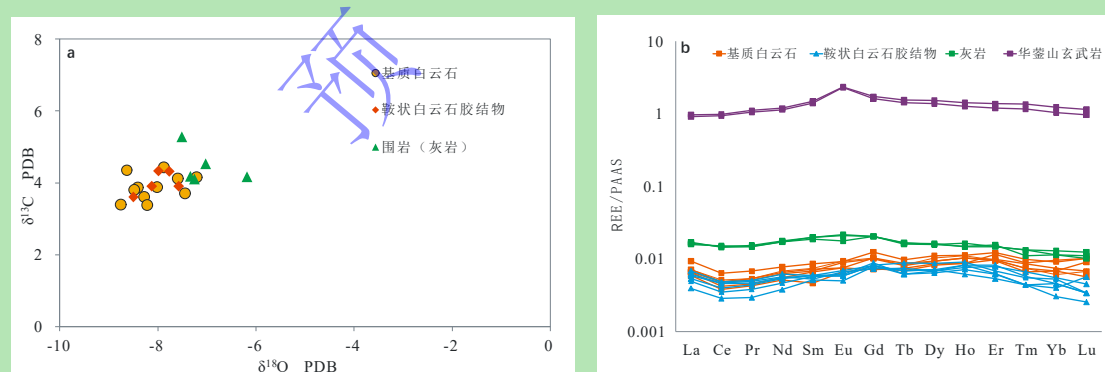


图 8 碳氧稳定同位素和 PAAS 标准化稀土元素配分图（华蓥山玄武岩数据来源于梁宇馨等，2021）
Fig.8 Patterns of C-O stable isotope and Post-Archean Average Shale (PAAS)-normalised rare earth element (REE) in the Second member of Maokou Formation (the REE data of basalt from Liang *et al.* 2021)

表 1 合川—潼南区块茅二段不同岩石组构碳氧同位素分析结果 ($\times 10^{-6}$)Table 1 Analysis results of carbon and oxygen isotopes of different rock formations in the Second member of Maokou Formation ($\times 10^{-6}$)

井号	编号	深度/m	样点	岩性	产状	检测结果/ ‰	
						$\delta^{13}\text{C PDB}$	$\delta^{18}\text{O PDB}$
HS4	5	4 326.25		泥晶灰岩	围岩 (灰岩)	4.54	-7.03
HS4	6	4 326.82		泥晶灰岩	围岩 (灰岩)	4.11	-7.25
HS4	7	4 327.34		生屑泥晶灰岩	围岩 (灰岩)	4.48	-7.41
TS3	D1	4 293.58		生屑泥晶灰岩	围岩 (灰岩)	5.28	-7.52
TS3	D2	4 305.20		细晶云岩	基质白云石	4.35	-8.64
TS3		4 306.04		细晶云岩	基质白云石	3.87	-8.41
TS3	D3	4 306.04		细晶云岩	鞍状白云石胶结物	3.60	-8.50
TS3	D4	4 308.14		细晶云岩	基质白云石	4.12	-7.60
TS3	D7	4 310.89		细晶云岩	基质白云石	4.43	-7.88
TS3	D8	4 315.94		细晶云岩	基质白云石	4.16	-7.21
TS3	D9	4 317.74		泥晶生屑灰岩	围岩 (灰岩)	4.18	-7.34
TS3	D10	4 324.40		泥晶生屑灰岩	围岩 (灰岩)	4.17	-6.19
TS4	7-43	4 283.07		生屑泥晶灰岩	围岩 (灰岩)	4.17	-6.09
TS4			1	细晶云岩	鞍状白云石胶结物	3.90	-8.13
TS4	H1	4 270.26	2	细晶云岩	基质白云石	3.38	-8.22
TS4			3	细晶云岩	基质白云石	3.71	-7.45
TS4			1	细晶云岩	鞍状白云石胶结物	3.90	-7.58
TS4	H2	4 273.85	2	细晶云岩	基质白云石	3.61	-8.28
TS4			1	细晶云岩	鞍状白云石胶结物	4.32	-7.77
TS4			2	细晶云岩	鞍状白云石胶结物	4.33	-7.99
TS4	H3	4 276.07	3	细晶云岩	基质白云石	3.39	-8.76
TS4			4	细晶云岩	基质白云石	3.80	-8.48
TS4			5	细晶云岩	基质白云石	3.88	-8.02

3.4.2 稀土元素

研究区内灰岩稀土元素总量 ($\sum\text{REE}$) 介于 $(2.899\sim 2.941) \times 10^{-6}$, 平均为 2.921×10^{-6} , 基质白云石稀土元素总量介于 $(0.706\sim 2.369) \times 10^{-6}$, 平均为 1.332×10^{-6} , 鞍状白云石胶结物稀土元素总量介于 $(0.685\sim 2.523) \times 10^{-6}$, 平均为 1.165×10^{-6} , 基质白云石和鞍状白云石胶结物稀土元素总量明显低于灰岩 (表 2), 基质白云石和鞍状白云石胶结物 $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 平均值差异不大。与灰岩相比, 两种白云石 $\sum\text{LREE}$ 含量降低较 $\sum\text{HREE}$ 更明显。从标准化的稀土元素分配模式 (图 8b) 可以看出, 基质白云石、鞍状白云石胶结物和石灰岩都具有轻稀土元素 (La~Eu) 含量小于重稀土元素 (Gd~Lu) 含量的特点, 没有“上倾”模式。梁宇馨等 (2021) 对华蓥山玄武岩的分析显示, 形成玄武岩的幔源流体 Eu 正异常特征明显, 而基质白云石和鞍状白云石胶结物 Eu 未见正异常, 显示负异常或无异常, 表明二者成岩过程中没有受到幔源流体的影响。

3.4.3 激光原位 U-Pb 同位素定年

激光原位 U-Pb 定年分析结果中, TS4 井 4 265.61 m 处选取样品的基质白云石形成时间为 262.00 ± 16.00 Ma (图 9a)、鞍状白云石形成时间为 259.10 ± 4.70 Ma (图 9b); 4 243.16 m 处选取样品的基质白云石形成时间为 262.8 ± 2.9 Ma (图 9c)、鞍状白云石形成时间为 260.10 ± 2.00 Ma (图 9d)。可以看出, 基质白云石约在 262.00~262.80 Ma, 对应地层年龄为中二叠系瓜德鲁普统卡匹敦阶 (259.51~264.28 Ma); 鞍状白云石形成时间约 259.10~260.10 Ma, 对应地层年龄为卡匹敦阶末期至乐平统吴家坪阶 (254.14~259.51 Ma)。同时, 两组数据均显示基质白云石形成时间早于鞍状白云石, 与薄片 (图 4g~j) 下观察到的成岩序列一致, 证实了检测结果的可靠性。

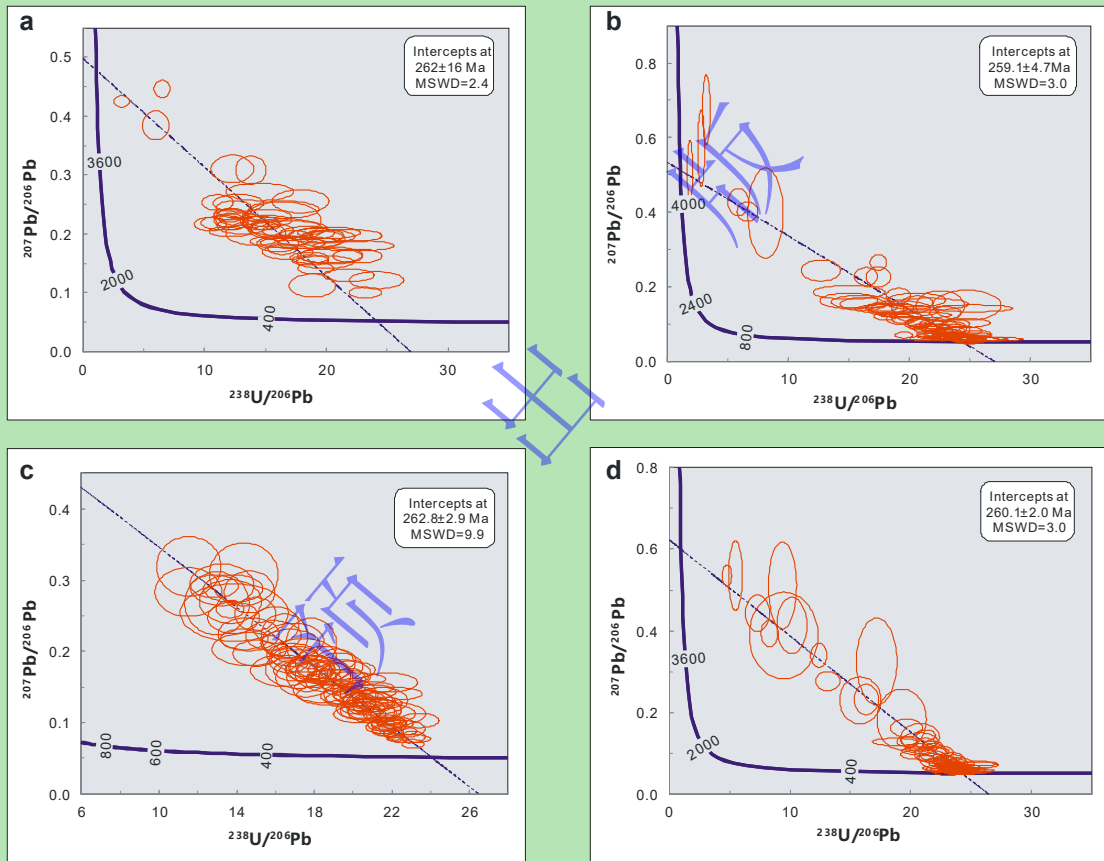


图 9 基质白云石与鞍状白云石胶结物激光原位 U-Pb 同位素年龄

(a) TS4 井, 4 265.61 m, 基质白云石, 262.00 ± 16.00 Ma; (b) TS4 井, 4 265.61 m, 鞍状白云石, 259.10 ± 4.70 Ma; (c) TS4 井, 4 243.16 m, 基质白云石, 262.80 ± 2.90 Ma; (d) TS4 井, 4 243.16 m, 鞍状白云石, 260.10 ± 2.00 Ma

Fig.9 U-Pb dating of matrix dolomite and saddle dolomite cement in the Second member of Maokou Formation (a) well TS4, 4 265.61 m, matrix dolomite, 262.00 ± 16.00 Ma; (b) well TS4, 4 265.61 m, saddle dolomite, 259.10 ± 4.70 Ma; (c) well TS4, 4 243.16 m, matrix dolomite, 262.80 ± 2.90 Ma; (d) well TS4, 4243.16 m, saddle dolomite, 260.10 ± 2.00 Ma

4 讨论

4.1 白云岩成因分析

合川—潼南地区茅口组储层主要为发育于茅二段的白云岩，明确白云岩成因至关重要。一般而言：早成岩期白云石化作用速度快、时间短，形成的白云石晶粒细，以泥晶、粉晶为主，且常保留原岩结构；而中—晚成岩期白云石化作用相对缓慢，形成的白云石晶粒较粗，常为细晶及以上（沈安江等，2016）。前人以研究区不同层位、不同沉积微相的晶粒白云岩为研究对象，开展白云石有序度专项分析（朱茂等，2022），发现同一层位内细晶白云岩与中晶白云岩的有序度差异较小（如差值 $<10\%$ ），且整体数值未随埋藏深度增加出现明显升高趋势。区内晶粒白云岩晶体以自形细、粉晶为主（图 4d, e），结合阴极发光弱发光或不发光特征（图 4g~j），综合指示研究区晶粒白云岩中的基质白云石形成于早成岩期（准同生—浅埋藏期）。

碳氧同位数分析测试结果（图 8a）显示，基质白云石和鞍状白云石胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 均落在同时期二叠纪海水的同位素范围内，两者的 $\delta^{18}\text{O}$ 较灰岩及同时期二叠纪海水略偏负，这一特征表明研究区白云石的成岩过程，受到埋藏期间温度升高的影响（Bau and Dulski, 1996）。基质白云石、鞍状白云石胶结物的稀土配分模式均与灰岩相似，指示三者物质来源上具有继承性。随着流体对岩石改造作用的推进，稀土元素总量 ΣREE 从灰岩（平均为 2.921×10^{-6} ）到基质白云石（平均为 1.332×10^{-6} ）、鞍状白云石胶结物（平均为 1.165×10^{-6} ）逐渐降低，与成岩序列一致。通常情况下高 ΣREE 含量（ $>100\times 10^{-6}$ ）指示样品中可能含有泥质或受热液改造（郑剑锋等，2021），研究区基质白云石和鞍状白云石胶结物 ΣREE 较低的特征，揭示了白云石化流体主要来源为海水。鞍状白云石胶结物 ΣHREE 降低较基质白云石更加明显，该差异可能是晚期有其他流体介入导致。通常幔源构造热液易造成岩石中 Eu 含量高值，稀土元素配分图（图 8b）显示华蓥山地区峨眉玄武岩具有显著的 Eu 正异常，而基质白云石和鞍状白云石胶结物 Eu 显示负异常或无异常，表明其形成于相对氧化的沉积环境、流体以海水为主，并未受深部幔源流体的影响，因此晚期介入流体为深部地层流体。U-Pb 同位素测年结果显示，基质白云石形成时间（262.00~262.80 Ma）（图 9a, c）早于峨眉玄武岩主喷发期（ $260.55\pm 0.07\text{ Ma}\sim 257.22\pm 0.37\text{ Ma}$ ）（Huang *et al.*, 2022），表明云化期间受峨眉地裂运动和峨眉山玄武岩的影响较弱或无影响；缝洞中充填的鞍状白云石的形成时间（259.10~260.10 Ma）（图 9b, d）与古热流值峰值（ $259.10\pm 0.50\text{ Ma}$ ）及玄武岩主喷发期相近，表明其形成可能受到了峨眉地裂运动和同时期古热流的直接影响。结合上述年代学证据可进一步推导，二叠纪古热流为地层提供了关键热量来源。该热量使地层中封存的海水和晚期介入流体，共同转化为深部地层流体。在地层异常高温的背景下，深部地层流体快速结晶形成鞍状白云石。综合上述岩石学特征、元素地球化学及年代学特征，可推测合川—潼南地

区茅二段普遍发育的白云岩形成于准同生—浅埋藏期，基质白云石成岩流体为海水，鞍状白云石胶结物成岩流体主要为海水，并有晚期深部地层流体介入。

勘探显示古地貌与研究区白云岩的发育具有很好的相关性，指示储层具有相控性（图 10a），古地貌高部位钻井揭示地层白云石化作用强、白云岩厚度大，低部位地层则白云石化作用弱、白云岩几乎不发育。结合茅口组特殊的构造—沉积背景，沉积期存在长期层间岩溶暴露面（图 10b），经大气淡水溶蚀形成多孔层，即古地貌高位先受暴露溶蚀形成初期孔隙。此时，海水相对变浅，可溶空间有限，滩体在原有地貌上溶蚀产生较多疏松孔隙、并发生叠置或迁移，这使得海水在海退周期内进一步受限，强烈蒸发加剧局限区域内海水咸化， Mg^{2+} 逐渐富集、 Mg/Ca 比增加。受东吴运动初始张裂活动的影响，研究区地壳活动加快，准同生期具有局限蒸发背景的高 Mg/Ca 比海水在相对氧化环境下进入到多孔滩相沉积物中，发生渗透回流白云石化作用形成晶粒白云岩（图 10c）。峨眉地裂运动及后期，下部地层中酸性热液顺断裂向上运移至白云岩层，并沿断裂溶蚀形成大量溶蚀孔洞（图 10d）。

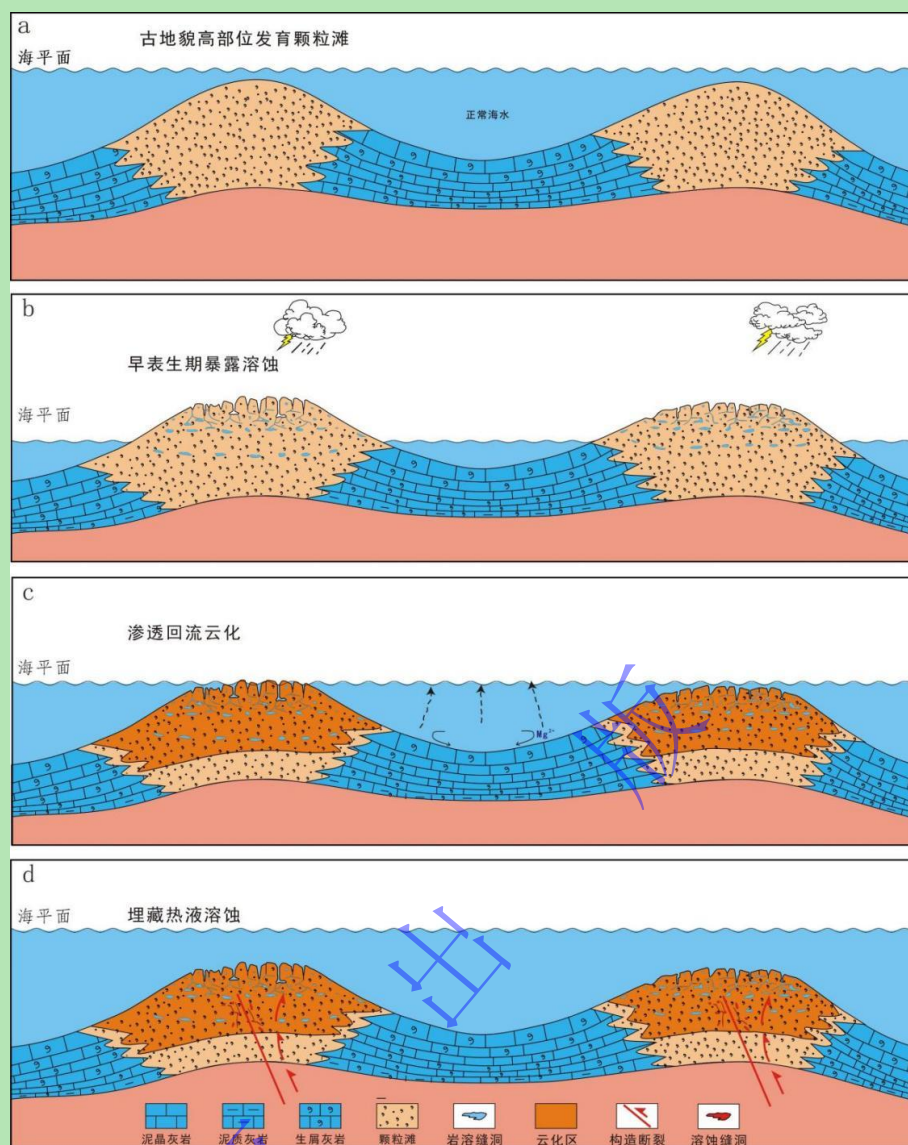


图 10 合川—潼南区块茅口组白云岩储层成因模式图

Fig.10 Model of sedimentary evolution and dolomite reservoir formation in the Second member of Maokou Formation in the Hechuan-Tongnan block, central Sichuan Basin

4.2 储层发育主控因素

4.2.1 颗粒滩是储层发育的物质基础

海相沉积储层的形成与沉积相密切相关，海平面的高频变化对储层的形成有控制作用（周进高等，2016）。结合前人对岩相古地理研究（肖笛等，2014）、区域地质背景和目前勘探情况，研究区茅二段沉积期均位于古地貌高部位，有利于颗粒滩发育，而岩石学特征亦证实储层原岩均为颗粒滩相，镜下可见生物碎屑颗粒幻影结构（图 4e, f），证实了储层发育受沉积相控制，生屑颗粒滩相是储层发育的基础，且以高位域的中上部最为发育，这时的生物繁盛、分布广泛且沉积厚度大，属于最有利的储集岩相发育带，也容易接受淡水溶蚀形成先期的基质孔。这与前人得出的中二叠统白云岩储层与高能环境沉积相相关的结论较为一

致（朱茂等，2022）。

4.2.2 早期白云石化为储层继承与改造创造了条件

碳氧同位素、稀土元素特征及 U-Pb 定年均揭示合川—潼南地区白云岩形成较早，茅二段储层孔隙只发育在白云岩层段，岩石薄片分析显示白云岩晶间溶孔、晶间孔占一定比例，这是由于早期的白云石化形成基质白云石，使岩石具有较强的抗压实和压溶能力，并具有很高的保存早期孔隙的能力（沈安江等，2015；Shalev *et al.*, 2021），从而使准同生期大气淡水形成的溶蚀孔得到继承，其中晶间孔主要是白云石化过程中调整原有孔隙空间后所形成（赵文智等，2018）；晚二叠纪与三叠纪初期，峨眉山大火成岩省活动引发大规模玄武岩喷发（ $260.55 \pm 0.07 \text{ Ma} \sim 257.22 \pm 0.37 \text{ Ma}$ ），强烈的构造活动使沉积期地层产生较多构造裂缝，在岩心和成像测井上可以看到高角度裂缝主要发育在白云岩段，这也是由白云岩本身的脆性特征决定的。由此可以看出，早期形成的基质白云石不仅继承了原岩中的孔隙，也为后期沿构造裂缝的溶蚀改造创造了条件。

4.2.3 埋藏热液溶蚀作用是储层形成的关键

区内茅二段白云岩主要发育晶间溶孔、溶缝和溶蚀孔洞，其中主要发育的溶蚀孔洞具有非均质（图 5a~c）分布特征，显微镜下具有明显的非组构选择性且白云石晶体被溶蚀成港湾状（图 5d），说明溶蚀孔洞为中—深埋藏期溶蚀作用的产物。峨眉地裂运动及后期（如印支运动）导致先期基底断裂活动开启，由众多深大伸展断层和走滑/逆冲断层控制的构造缝，为处于埋藏期的茅二段地层与下部地层打通流体运移通道（潘立银等，2022；Feng *et al.*, 2024），大量中酸性热液顺断裂向上运移并在裂缝发育的白云岩层中汇集，溶蚀形成大量溶蚀孔洞（图 10d），因此，埋藏期热液溶蚀作用是储层形成的关键。然而，研究区内样品的稀土元素分配模式（图 8b）中 Eu 元素并未发生明显的正异常，这与陈曼霏等学者分析的中 Eu 元素正异常数据存在一定差异（陈曼霏等，2026），表明受断裂延伸的影响，部分断裂并未沟通基地，因而沿断裂运移的流体未受到岩浆热液的影响。就研究区而言，溶蚀孔洞和溶缝边缘胶结的鞍状白云石地球化学特征与基质白云石较为相似，二者成岩流体均以地层中封存的富镁海水为主；而鞍状白云石胶结物 U-Pb 同位素年龄显示其形成时间与峨眉地裂运动和峨眉山玄武岩的主喷发期时间相近，说明持续的构造运动导致断裂不断形成（蒋裕强等，2018），这些断裂沟通了深部地层导致相对高温的富镁地层水向上运移，地层中封存的富镁海水和深部富镁地层水混合，并在先期形成的溶蚀孔洞和溶缝中沉淀形成鞍状白云石，古热流为鞍状白云石的形成提供了热量。虽然鞍状白云石胶结作用对储层起破坏作用，但岩心揭示鞍状白云石胶结物发育在缝洞边缘，多数储集空间仍被保留并为后期油气聚集提供了场

所。综上茅二段白云岩形成机理及储层发育主控因素认识，可预测有利储层主要分布于相对较高古地貌及深大断裂周缘部位。

5 结论

(1) 川中合川—潼南地区茅口组二段岩石类型多样，晶粒白云岩储层为主要储集岩类，储集空间以溶蚀孔洞为主。基质白云石与缝洞中充填的鞍状白云石指示至少两期流体形成，基质白云石的阴极发光、氧同位素偏负、稀土元素及U-Pb定年等特征共同指示其主要属回流渗透白云石化作用成因；鞍状白云石岩石学特征、Eu无正异常及U-Pb年龄（259.10~260.10 Ma）与古热流值峰值及玄武岩主喷发期相近，指示浅一中埋藏期热流导致地层流体温度升高促使流体快速沉淀结晶，从而形成具有鞍状特征的白云石。

(2) 茅二段准同生—浅埋藏白云石化作用使原岩孔隙得以继承并调整，形成的白云石晶间孔为后期流体提供了运移通道；高温地层流体早期沿着基岩或岩溶系统内部的原始孔洞或裂缝持续扩溶形成溶蚀孔洞及裂缝，浅一中埋藏白云石化作用虽充填一半充填早期溶蚀孔洞及裂缝、减少了部分储集空间，但未充填一半充填的残余孔洞及裂缝仍为主要储集空间。

(3) 储层主要受沉积相、早期白云石化和与构造作用相关的埋藏溶蚀作用控制，古地貌高部位的高能生屑滩易露出海平面，并受到大气淡水的溶蚀作用形成多孔沉积物，是储层发育的物质基础；准同生—浅埋藏期白云石化作用对早期孔隙起到继承和保护作用，同时性脆的白云岩中易形成构造缝，在提高储层物性的同时为后期溶蚀改造创造了条件；与峨眉山地裂运动相关的埋藏热液溶蚀作用是储层发育的关键，在白云岩中顺裂缝形成大量非均质分布的溶蚀孔洞。

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行（Science Data Bank, ScienceDB）平台公开发布，访问地址为 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.cjxb.00010> 和 <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.cjxb.00010>。

致谢 感谢邵红梅教授全程学术指导，感谢相关单位提供岩心、沉积测试数据与技术支持。诚挚感谢三位评审专家与编辑部老师的宝贵意见与辛勤工作。

参考文献（References）

- 陈曼霏, 张本健, 陈洪斌, 等. 2026. 川中地区中二叠统茅口组深层白云岩成因机理及控储机制[J]. 海相油气地质, 31(1): 33-47. [Chen Manfei, Zhang Benjian, Chen Hongbin, et al. 2026. Genesis mechanisms and reservoir-controlling mechanisms of deep dolomite of the Middle Permian Maokou Formation in central Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 31(1): 33-47]
- 陈轩, 赵文智, 张利萍, 等. 2012. 川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义[J]. 石油学报, 33(4): 562-569. [Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Zhang Liping, et al. 2012. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal

- dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(4): 562-569.]
- 冯明友, 高瑞琪, 王兴志, 等. 2023. 川西南宝兴地区二叠系栖霞组一段白云岩储层充填序列及流体指示[J]. 岩性油气藏, 35(2): 11-20. [Feng Mingyou, Gao Ruiqi, Wang Xingzhi, et al. 2023. Sequence filling succession and fluid indication of dolomite reservoirs of the first member of Permian Qixia Formation in Baoxing area, southwestern Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 35(2): 11-20.]
- 冯明友, 尚俊鑫, 沈安江, 等. 2024. 幕式热液作用对川西南部中二叠统碳酸盐岩储集层复合改造效应及地质意义[J]. 石油勘探与开发, 51(1): 74-87. [Feng Mingyou, Shang Junxin, Shen Anjiang, et al. 2024. Episodic hydrothermal alteration on Middle Permian carbonate reservoirs and its geological significance in southwestern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(1): 74-87.]
- 何江, 连志华, 罗文军, 等. 2024. 台内滩型薄层状白云岩储集层特征及主控因素: 以四川盆地高石梯—磨溪地区中二叠统栖霞组为例[J]. 石油勘探与开发, 51(1): 62-73. [He Jiang, Lian Zhihua, Luo Wenjun, et al. 2024. Characteristics and main controlling factors of intra-platform shoal thin-layer dolomite reservoirs: A case study of Middle Permian Qixia Formation in Gaoshiti-Moxi area of Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(1): 62-73.]
- 何溥为, 胥旺, 张连进, 等. 2021. 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, 39(6): 1532-1545. [He Puwei, Xu Wang, Zhang Lianjin, et al. 2021. Characteristics and genetic mechanism of Qixia Formation dolomite in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1532-1545.]
- 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 2019. 四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 39(6): 13-21. [Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Huang Renchun, et al. 2019. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 39(6): 13-21.]
- 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 2012. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 39(1): 45-55. [Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Wei Guoqi, et al. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(1): 45-55.]
- 黄涵宇, 何登发, 李英强, 等. 2017. 四川盆地及邻区二叠纪梁山—栖霞组沉积盆地原型及其演化[J]. 岩石学报, 33(4): 1317-1337. [Huang Hanyu, He Dengfa, Li Yingqiang, et al. 2017. The prototype and its evolution of the Sichuan sedimentary basin and adjacent areas during Liangshan and Qixia stages in Permian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1317-1337.]
- 姜自然, 陆正元, 吕宗刚, 等. 2014. 四川盆地东吴期泸州古隆起与茅口组碳酸盐岩缝洞储层分布[J]. 石油实验地质, 36(4): 411-415. [Jiang Ziran, Lu Zhengyuan, Lü Zonggang, et al. 2014. Distribution of carbonate fractured and vuggy reservoirs of Maokou Formation in Luzhou paleo-uplift during Dongwu Movement, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(4): 411-415.]
- 蒋裕强, 谷一凡, 李开鸿, 等. 2018. 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, 38(2): 16-24. [Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Li Kaihong, et al. 2018. Space types and origins of hydrothermal dolomite reservoirs in the Middle Permian strata, central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 38(2): 16-24.]
- 金振奎, 冯增昭. 1999. 滇东—川西中二叠统白云岩的形成机理: 玄武岩淋滤白云化[J]. 沉积学报, 17(3): 383-389. [Jin Zhenkui, Feng Zengzhao. 1999. Origin of dolostones of the Lower Permian in east Yunnan—west Sichuan: Dolomitization through leaching of basalts[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(3): 383-389.]
- 李开, 谢淑云, 雷蕾, 等. 2018. 鲕粒碳酸盐岩溶蚀的微观形貌特征实验研究[J]. 海相油气地质, 23(4): 61-70. [Li Kai, Xie Shuyun, Lei Lei, et al. 2018. Surface micromorphology of dissolved oolitic carbonate rocks[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 23(4): 61-70.]
- 李让彬, 段金宝, 潘磊, 等. 2021. 川东地区中二叠统茅口组白云岩储层成因机理及主控因素[J]. 天然气地球科学, 32(9): 1347-1357. [Li Rangbin, Duan Jinbao, Pan Lei, et al. 2021. Genetic mechanism and main controlling factors of the Middle Permian Maokou Formation dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 32(9): 1347-1357.]
- 梁宇馨, 李红, 张冬冬, 等. 2021. 四川盆地华蓥山峨眉玄武岩地球化学特征及其成因分析[J]. 地质科学, 56(1): 288-302. [Liang Yuxin, Li Hong, Zhang Dongdong, et al. 2021. Geochemical characteristics and genetic analysis of Huayingshan Emeishan basalt in Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 56(1): 288-302.]

- 刘邓, 曹锦鹏, 杨珊珊, 等. 2024. 微生物异化还原水铁矿介导的 Ca-Fe 碳酸盐矿物形成: 对铁白云石成因的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 54(1): 216-230. [Liu Deng, Cao Jinpeng, Yang Shanshan, et al. 2024. Microbially-mediated formation of Ca-Fe carbonates during dissimilatory ferrihydrite reduction: Implications for the origin of sedimentary ankerite[J]. Science China Earth Sciences, 54(1): 216-230.]
- 刘建强, 郑浩夫, 刘波, 等. 2017. 川中地区中二叠统茅口组白云岩特征及成因机理[J]. 石油学报, 38(4): 386-398. [Liu Jianqiang, Zheng Haofu, Liu Bo, et al. 2017. Characteristics and genetic mechanism of the dolomite in the Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan area[J]. Acta Petrolei Sinica, 38(4): 386-398.]
- 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 2016. 四川叠合盆地深层海相碳酸盐岩油气的形成和分布理论探讨[J]. 中国石油勘探, 21(1): 15-27. [Liu Shugen, Sun Wei, Zhong Yong, et al. 2016. Discussion on the theories of the hydrocarbon formation and distribution of the deep-seated marine carbonates in the Sichuan superimposed basin, China[J]. China Petroleum Exploration, 21(1): 15-27.]
- 刘媛媛, 王子晨, 明鑫雨, 等. 2024. 震旦系—下寒武统白云岩优势成岩—成储效应—深层白云岩成因及差异成储[J]. 沉积学报, 42(6): 2159-2173. [Liu Yuanyuan, Wang Zichen, Ming Xinyu, et al. 2024. Profitable diagenetic path and reservoir formation efficiency of the Sinian-lower Cambrian dolostone: Origins of deep dolomites and differential reservoir formation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(6): 2159-2173.]
- 芦非凡. 2021. 四川盆地二叠系栖霞组白云岩成因及地质意义[D]. 成都: 西南石油大学. [Lu Feifan. 2021. Origin of the dolomite and geological significance in the Permian Qixia Formation, Sichuan Basin, SW China[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University.]
- 罗志立, 孙玮, 韩建辉, 等. 2012. 峨眉地幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨[J]. 地学前缘, 19(6): 144-154. [Luo Zhili, Sun Wei, Han Jianhui, et al. 2012. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in Middle-Upper Yangtze area[J]. Earth Science Frontiers, 19(6): 144-154.]
- 潘立银, 郝毅, 梁峰, 等. 2022. 白云岩储层成因的激光原位 U-Pb 定年和同位素地球化学新证据: 以四川盆地西北部中二叠统栖霞组白云岩储层为例[J]. 石油学报, 43(2): 223-233. [Pan Liyin, Hao Yi, Liang Feng, et al. 2022. New evidence of laser in-situ U-Pb dating and isotopic geochemistry for the genesis of dolomite reservoir: A case study of dolomite reservoir from Middle Permian Qixia Formation in northwestern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 43(2): 223-233.]
- 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 2015. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 42(5): 545-554. [Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. 2015. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 42(5): 545-554.]
- 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 2021. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 48(3): 476-487. [Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. 2021. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 476-487.]
- 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 2016. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 340-349. [Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, et al. 2016. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in lower-middle Cambrian, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(3): 340-349.]
- 沈平, 张健, 宋家荣, 等. 2015. 四川盆地中二叠统天然气勘探新突破的意义及有利勘探方向[J]. 天然气工业, 35(7): 1-9. [Shen Ping, Zhang Jian, Song Jiarong, et al. 2015. Significance of new breakthrough in and favorable targets of gas exploration in the Middle Permian system, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 35(7): 1-9.]
- 苏旺, 江青春, 陈志勇, 等. 2015. 四川盆地中二叠统茅口组层序地层特征及其对源储的控制作用[J]. 天然气工业, 35(7): 34-43. [Su Wang, Jiang Qingchun, Chen Zhiyong, et al. 2015. Sequence stratigraphic features of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and their controls on source rocks and reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 35(7): 34-43.]
- 杨朝屹, 夏青松, 杨鹏, 等. 2026. 川西—川北地区中二叠统白云岩成岩流体特征分析及复合成岩环境重建[J]. 沉积学报, 44(1): 235-254. [Yang Chaoyi, Xia Qingsong, Yang Peng, et al. 2026. Characteristics analysis of diagenetic fluids and reconstruction of composite diagenetic environment of Middle Permian dolostones in western and northern Sichuan region [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(1): 235-254.]
- 田景春, 林小兵, 张翔, 等. 2014. 四川盆地中二叠统栖霞组滩相白云岩多重成因机理及叠加效应[J]. 岩石学报, 30(3): 679-686.

- [Tian Jingchun, Lin Xiaobing, Zhang Xiang, et al. 2014. The genetic mechanism of shoal facies dolomite and its additive effect of Permian Qixia Formation in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 679-686.]
- 王良军, 李红, 曾韬, 等. 2022. 四川盆地东部茅口组白云岩成因: 来自岩石学、矿物学和地球化学的证据[J]. *古地理学报*, 24(5): 989-1016. [Wang Liangjun, Li Hong, Zeng Tao, et al. 2022. Origins of dolostones of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin: Evidence from lithology, mineralogy, and geochemistry[J]. *Journal of Palaeogeography*, 24(5): 989-1016.]
- 王伟, 任丽梅, 梁家驹, 等. 2022. 川中地区中二叠统海相烃源岩特征及生烃潜力评价[J]. *天然气地球科学*, 33(3): 369-380. [Wang Wei, Ren Limei, Liang Jiaju, et al. 2022. Characteristics and hydrocarbon generation potential of Middle Permian marine source-rocks in central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 33(3): 369-380.]
- 肖笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 2014. 四川盆地南部中二叠统茅口组古岩溶地貌恢复及其石油地质意义[J]. *地质学报*, 88(10): 1992-2002. [Xiao Di, Tan Xiucheng, Shan Shujiao, et al. 2014. The restoration of palaeokarst geomorphology of Middle Permian Maokou Formation and its petroleum geological significance in southern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1992-2002.]
- 肖钦仁, 袁海锋, 谌辰, 等. 2024. 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*, 35(7): 1160-1186. [Xiao Qinren, Yuan Haifeng, Shen Chen, et al. 2024. 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*, 35(7): 1160-1186.]
- 谢武仁, 文龙, 汪泽成, 等. 2024. 四川盆地深层—超深层碳酸盐岩油气成藏条件与勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 29(5): 61-76. [Xie Wuren, Wen Long, Wang Zecheng, et al. 2024. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep-ultra-deep carbonate rocks in Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 29(5): 61-76.]
- 徐婷, 袁海锋, 陈聪, 等. 2024. 川中磨溪—龙女寺构造中二叠统茅口组白云岩成因分析[J]. *天然气地球科学*, 35(1): 13-29. [Xu Ting, Yuan Haifeng, Chen Cong, et al. 2024. Genesis of dolomite reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation of the Moxi-Longnvisi structure, central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 35(1): 13-29.]
- 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 2018. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. *石油勘探与开发*, 45(6): 923-935. [Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. 2018. Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(6): 923-935.]
- 赵文智, 沈安江, 郑剑锋, 等. 2014. 塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(9): 1925-1939. [Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. 2014. The porosity origin of dolomite reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos Basins and its implication to reservoir prediction[J]. *Science China Earth Sciences*, 44(9): 1925-1939.]
- 郑剑锋, 沈安江, 杨翰轩, 等. 2021. 塔里木盆地西北缘震旦系微生物白云岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 37(7): 2189-202. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. 2021. Geochemistry and geochronology characteristics and their geological significance of microbial dolomite in Upper Sinian, NW Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2189-202.]
- 钟原, 杨跃明, 文龙, 等. 2021. 四川盆地西北部中二叠统茅口组岩相古地理、古岩溶地貌恢复及其油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 48(1): 81-93. [Zhong Yuan, Yang Yueming, Wen Long, et al. 2021. Reconstruction and petroleum geological significance of lithofacies paleogeography and paleokarst geomorphology of the Middle Permian Maokou Formation in northwestern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(1): 81-93.]
- 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 2016. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. *天然气工业*, 36(4): 8-15. [Zhou Jingao, Yao Genshun, Yang Guang, et al. 2016. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 36(4): 8-15.]
- 朱茂, 黄世伟, 宋叙, 等. 2022. 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*, 27(4): 149-161. [Zhu Mao, Huang Shiwei, Song Xu, et al. 2022. Main controlling factors of the Middle Permian dolomite reservoir and prediction of exploration zone in Tongnan-Hechuan block, Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 149-161.]
- Bau M, Dulski P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 79(1/2): 37-55.

- Feng M Y, Shang J X, Shen A J, et al. 2024. Episodic hydrothermal alteration on Middle Permian carbonate reservoirs and its geological significance in southwestern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(1): 81-96.
- Huang H, Huyskens M H, Yin Q Z, et al. 2022. Eruptive tempo of Emeishan large igneous province, southwestern China and northern Vietnam: Relations to biotic crises and paleoclimate changes around the Guadalupian-Lopingian boundary[J]. *Geology*, 50(9): 1083-1087.
- Koeshidayatullah A, Corlett H, Hollis C. 2021. An overview of structurally-controlled dolostone-limestone transitions in the stratigraphic record[J]. *Earth-Science Reviews*, 220: 103751.
- Nader F H, Swennen R, Ellam R M, et al. 2007. Field geometry, petrography and geochemistry of a dolomitization front (Late Jurassic, central Lebanon)[J]. *Sedimentology*, 54(5): 1093-1120.
- Shalev N, Bontognali T R R, Vance D. 2021. Sabkha dolomite as an archive for the magnesium isotope composition of seawater[J]. *Geology*, 49(3): 253-257.
- Shang J X, Feng M Y, Wang X Z, et al. 2023. Alteration effects of karstification and hydrothermalism on Middle Permian Qixia Formation at the Wulong section, South China[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 13128.

Mechanism of Dolomitization and Reservoirs in the Second Member of Permian Maokou Formation in Hechuan-Tongnan Block, Central Sichuan Basin

BAI XueJing^{1,2}, LIU YunMiao^{1,2}, HONG ShuXin^{1,2}, YU XinChen^{1,2}, ZHAO Wei¹, SHI JiangBo^{1,2}, LIU LianJie^{1,2}, LU Xi^{1,2}, GE ZhiDan¹, ZHANG Bo¹

1. Daqing Oilfield Research Branch, Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC, Daqing, Heilongjiang 163712, China

2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Limited Company., Daqing, Heilongjiang 163712, China

Abstract: [Objective] The Hechuan-Tongnan block in the central Sichuan Basin has drilled multiple high-yield wells in the Second member of the Permian Maokou Formation dolostones, revealing significant exploration prospects. However, the characteristics and genesis of dolomite reservoirs remain unclear, hindering the prediction of favorable reservoir distribution. [Methods] Based on observations of cores and thin sections, combined with geochemical methods such as carbon-oxygen isotopes, rare earth elements, and carbonate U-Pb dating, a systematic study was conducted on the genesis and controlling factors of the Second member of the Maokou dolomite reservoir. [Results] The Second member of the Maokou Formation in the study area mainly consists of four rock types: bioclastic-bearing micrite limestone, micrite bioclastic limestone, dolomitic limestone, and grain-bearing dolomite. Among these, grain-bearing dolomite is the primary reservoir rock type. There are three types of reservoir spaces: intergranular dissolution pores, dissolution pores, and dissolution fractures, with dissolution pores being the most developed. The formation of dolomite occurred during the quasi-syngenetic shallow burial period, with early matrix dolomite and late saddle dolomite formed at 262 ± 16 Ma and 259.1 ± 4.7 Ma, when high Mg/Ca ratio seawater infiltrated and flowed back into the porous beach sediments in the confined environment between the shoals, leading to dolomitization. [Conclusions] The reservoir is controlled by sedimentary facies, early dolomitization, and burial hydrothermal dissolution related to structural fractures. The

high-energy particle beach facies in the elevated areas of palae-morphology provide the basis for reservoir development. Dolomitization during the quasi-syngenetic shallow burial period created conditions for the preservation of early pores and their transformation during the mid-deep burial period. The hydrothermal dissolution process related to the Emei taphrogenesis leads to the heterogeneous development of dissolution pores, which is key to reservoir development.

Key words: Sichuan Basin; Permian; Maokou Formation; dolomitization; reservoir-forming mechanism

