

塔里木和四川盆地白云岩规模优质储层形成与发育控制因素

乔占峰^{1,2,3}, 张哨楠¹, 沈安江^{2,3}, 余敏^{2,3}, 黄理力^{2,3}, 李文正^{2,3}, 邵冠铭^{2,3}, 戴传瑞²

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 3. 中国石油天然气集团公司 碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023)

摘要:通过对塔里木和四川盆地典型实例的对比,基于白云石化作用与孔隙形成机制和期次的分析,梳理了白云岩规模优质储层发育控制因素,提出了准同生期白云石化作用是储层规模化发育的关键;溶蚀作用是提升白云岩储层质量的必要条件;规模优质储层发育的前提在于白云石化作用和溶蚀作用发生的耦合关系。提出3种有利于规模优质白云岩储层发育的地质过程:(准)同生云化伴生溶蚀型、埋藏云化继承型和后生溶蚀改造型。云化伴生溶蚀型指白云岩储层主要形成于准同生白云石化作用伴生溶蚀作用改造,主要发育于海平面下降背景下的高能礁/丘滩相和潮坪相。埋藏云化继承型为先期储层经浅埋藏期白云石化作用改造而成,储层质量和规模性受控于相带和云化前溶蚀改造的强度。后生溶蚀改造型为白云岩储层经热液或表生岩溶改造而成,兼具相控性、断控性和面控性,储层质量和规模性受先期储层发育状况的显著控制。以上认识对深层白云岩规模优质储层的预测具有重要指导意义。

关键词:白云岩储层;白云石化;埋藏云化;深层白云岩;四川盆地;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Controls on formation and development of large-sized high-quality dolomite reservoirs in the Tarim and Sichuan Basins

Qiao Zhanfeng^{1,2,3}, Zhang Shaonan¹, Shen Anjiang^{2,3}, She Min^{2,3}, Huang Lili^{2,3},
Li Wenzheng^{2,3}, Shao Guanming^{2,3}, Dai Chuanrui²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
3. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Following a comparative analysis of the main mechanisms and periods of dolomitization and dissolution in typical dolomite reservoirs in Tarim and Sichuan Basins, we identified the factors controlling the development of large-sized high-quality dolomite reservoirs: penecontemporaneous dolomitization is crucial to the scale of the reservoirs and dissolution modification is necessary for the quality of the reservoirs, thus the coupling of dolomitization with dissolution is the prerequisite for the development of large and high-quality dolomite reservoirs. Three geological processes that facilitate the development of the reservoirs were also brought forward: the (pene-) contemporaneous dolomitization associated with dissolution that mainly formed high-energy mound/reef-shoal and tidal-flat reservoirs against the backdrop of sea level fall; the adoptive burial dolomitization that mostly created reservoirs through shallow dolomitization of preexisting reservoirs, with quality and scale conditioned by the facies and dissolution intensity of preexisting reservoirs; and the epigenetic modification by dissolution that formed reservoirs after a hydrothermal or meteoric karstification of preexisting dolomite reservoirs, with quality and size controlled by facies, faults and unconformities as well as the development of the preexisting dolomite reservoirs. The above understandings may shed light on the prediction of large-sized deep high-quality dolomite reservoirs.

收稿日期:2020-03-30;修订日期:2021-05-06。

第一作者简介:乔占峰(1983—),男,博士研究生、高级工程师,碳酸盐岩层序地层和沉积储层。E-mail:qiaozf_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05004-002);中国石油重点科技项目(2019B-0406);中国石油基础性前瞻性科技项目(2021DJ0503)。

Key words: dolomite reservoir, dolomitization, burial dolomitization, deep dolomite, Tarim Basin, Sichuan Basin

引用格式: 乔占峰, 张哨楠, 沈安江, 等. 塔里木和四川盆地白云岩规模优质储层形成与发育控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 92-104.

DOI: 10. 11743/ogg20220108.

Qiao Zhanfeng, Zhang Shaonan, Shen Anjiang, et al. Controls on formation and development of large-sized high-quality dolomite reservoirs in the Tarim and Sichuan Basins[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 92-104. DOI: 10. 11743/ogg20220108.

全球碳酸盐岩中油气资源约一半以上储存于白云岩中,北美地区更达到80%以上^[1],国内勘探实践也揭示深层碳酸盐岩油气储层主要发育于白云岩地层中^[2],前人对白云岩提出多种成因模式并被证实^[3],如蒸发泵^[4]、海水^[5]、渗透回流^[6]、埋藏^[7]、热液^[8-9]和微生物白云石化作用^[10]等,虽仍有很多机理问题有待解决,已可对大多数白云岩形成和分布进行解释^[11]。

然而,并非所有白云岩都可构成优质储层^[3],更关键的问题是预测规模优质白云岩储层的分布^[3,12-13]。近年的勘探面临的问题是即使钻遇厚层白云岩,也存在有效储层占比低、储层质量不高的风险。白云岩储层作为深层油气勘探的主要对象,埋藏深、投资大,要求兼具规模性和优质性,因此亟待深化白云岩储层规模化和优质化发育控制因素认识。

Sun(1995)梳理全球64个实例指出白云岩储层主要发育于环湖坪环境、湖坪或潟湖相关的潮下碳酸盐岩、蒸发岩相关的潮下碳酸盐岩、以及台缘建隆或断裂带相关的无蒸发岩碳酸盐岩层序等四种背景^[12]。国内学者以白云岩成因为基础指出塔里木、四川和鄂尔多斯盆地发育萨布哈白云岩储层、渗透回流白云岩储层、埋藏白云岩储层、热液白云岩储层和构造裂缝型白云岩储层等^[14-15],除热液和构造裂缝型白云岩储层受断裂控制外,都具明显的相控性^[16-18]。但勘探实践揭示有利相带并不总发育规模优质储层,白云岩储层规模化、优质化发育的控制因素仍有待进一步研究。

本文通过对塔里木和四川盆地典型储层实例解剖,提出白云石化作用发生阶段和溶蚀作用改造是白云岩储层规模化和优质化发育的关键要素,在此基础上对规模优质白云岩储层发育规律进行了探讨,对于深层储层分布预测具有指导意义。

1 准同生云化作用对储层规模化发育的重要性

云化作用对白云岩储层孔隙的贡献一直存在争议,经历了“增孔论”^[19-20]和“减孔论”^[13]之争后,Warren指出受原始沉积组构和云化流体量控制云化作用可增孔、减孔或保存孔隙^[3]。国内学者更强调云化作用对

早期基质孔隙的保存作用^[2,15,21],但云化作用在何种情况下保存孔隙未有深入分析。

通过重点实例解剖,认识到早期基质孔是白云岩储层规模化发育的基础,云化作用发生阶段是影响基质孔埋藏演化与保存的关键因素。云化作用对碳酸盐岩矿物造成的最大转变是埋藏期抗压溶能力增强,减少源内胶结物,且可发生在多个成岩阶段^[3],因此云化作用发生阶段的不同将影响孔隙演化走向,发生越早越有利于准同生期形成孔隙的保存,延迟发生会由于压实或压溶作用的发生而导致早期基质孔的大量损失;成岩后期的云化作用则多表现为对孔隙的破坏性充填。

1.1 (准)同生期云化作用的孔隙保存效应

(准)同生期云石作用有微生物、海水和蒸发泵云化作用^[3],可将沉积物在(准)同生期转换为白云岩,提高基质孔的抗压能力,以塔里木盆地柯坪-巴楚地区下寒武统肖尔布拉克组微生物白云岩为例。

柯坪-巴楚地区肖尔布拉克组发育大规模的微生物白云岩^[22],包括:构成微生物丘的凝块石白云岩和藻格架白云岩(图1a),构成砂屑滩的粘结藻砂屑白云岩(图1b),以及构成滩坪体系的藻砂屑白云岩和泡沫绵白云岩(图1c)^[22]。其中,藻格架白云岩、藻砂屑白云岩和泡沫绵白云岩为主要储集岩,发育格架孔(孔洞)、粒间孔和窗格孔等,平均孔隙度为2.32%~5.5%,最大超10%,储集性能好(图2)。中缓坡丘滩复合体整体构成块状储层,带状分布,丘滩复合体背侧的滩坪相泡沫绵白云岩储层厚约30 m左右,横向延伸超30 km,具有较好的规模性^[22]。

分析显示,该类岩石能发育规模优质储层与云化作用发生较早不无关系。露头薄片显示,白云岩组构与微生物生长活动密切相关,地球化学上表现出有序度低($0.4 \sim 0.6$)、碳同位素值偏正($\delta^{13}\text{C} < 2\text{‰}$)、氧同位素值略偏负($\delta^{18}\text{O} = 0 \sim -4\text{‰}$),为同沉积期微生物白云石化作用^[23]。也就是说,在格架孔、粒间孔以及窗格孔形成的同时,岩石同步经历云化作用,致使埋藏期具有较强的抗压实能力。因此尽管格架孔宽高比大(图1a)、窗格孔远大于颗粒组构(图1c),经历长期埋

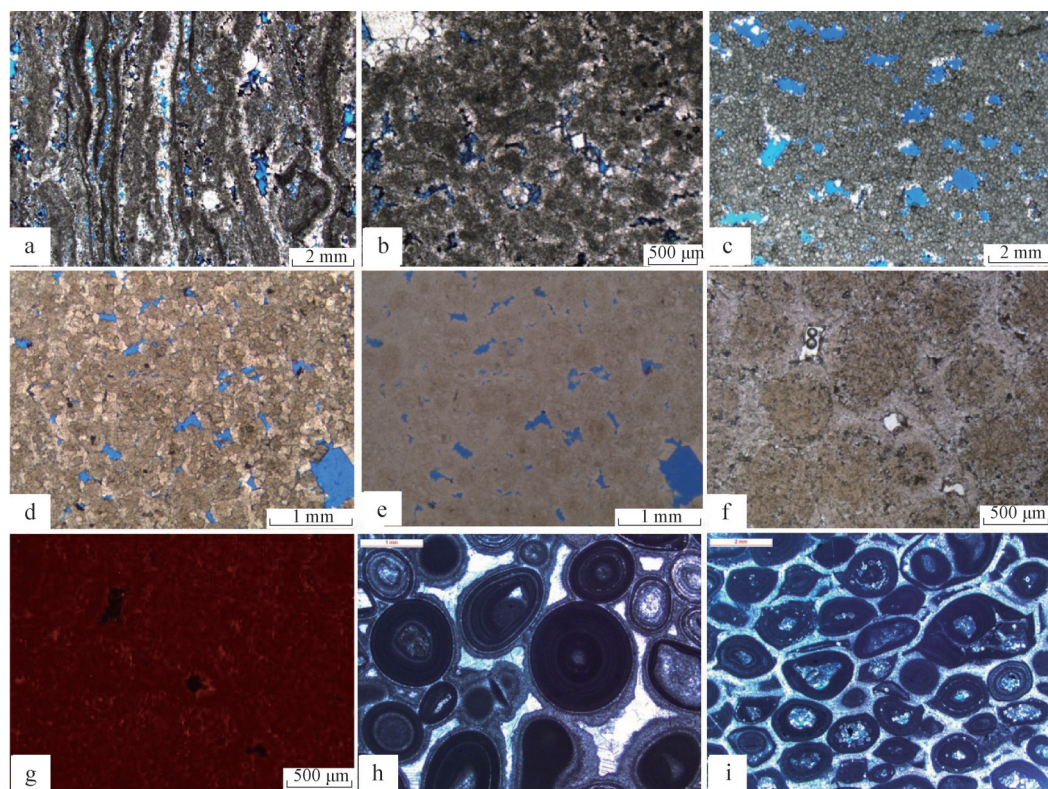


图1 白云石化作用阶段对孔隙演化影响典型照片

Fig. 1 Micrographs showing the influence of dolomitization on pore evolution

a. 藻格架白云岩, 格架孔发育, 白云石部分充填, 下寒武统肖尔布拉克组, 埋深1 885.6 m, ST1井, 铸体薄片; b. 藻砂屑颗粒白云岩, 可识别藻砂屑颗粒, 但颗粒结构不甚清晰, 局部为粘结结构, 粒间孔发育, 苏盖特布拉克剖面, 下寒武统肖尔布拉克组, 蓝色铸体; c. 泡沫棉白云岩, 球状藻密集发育, 膏模孔和鸟眼孔发育, 肖尔布拉克剖面, 肖尔布拉克组, 蓝色铸体, 单偏光; d. 晶粒白云岩, 晶间孔发育, 下寒武统肖尔布拉克组, 埋深7 767.6 m, CT1井, 蓝色铸体, 单偏光; e. 鲕粒白云岩, 粒间孔发育, 局部可见颗粒为线接触, 受压实作用改造, 下寒武统肖尔布拉克组, 埋深7 767.6 m, CT1井(视域同D, 光源与薄片间加滤纸进行原岩结构恢复后), 原岩结构恢复片; f. 鲕粒白云岩, 环边胶结物发育, 残留粒间孔下寒武统肖尔布拉克组, CT1井, 单偏光; g. 阴极发光显示昏暗发光, 少量白云石发橘色光, 视域同f, 显示鲕粒与胶结物发光特征相同; h. 鲕粒灰岩, 渗流带环边胶结发育, 粒间孔被晚期粒状方解石晚期充填, 飞仙关组, 四川盆地齐岳山剖面, 单偏光; i. 鲕粒灰岩, 文石质等厚环边胶结发育, 受压实作用改造鲕粒和胶结物同时发生变形, 粒间孔完全丢失, 飞仙关组, 四川盆地齐岳山剖面, 单偏光

藏演化后, 仍未见显著的压实减孔现象。云化作用发生较早是该类储层规模优质发育的关键。

1.2 白云石化作用滞后对孔隙损失的影响

白云石化作用可在沉积物进入浅埋藏期后发生, 如渗透回流白云石化作用^[3]。该阶段上覆沉积物厚度加大, 在云化改造前经受较强的胶结或压实作用改造, 致使孔隙损失严重, 以塔中地区肖尔布拉克组为例。

塔中地区肖尔布拉克组沉积期位于塔西南古隆起北斜坡, 呈“平台”地形特点, 面积达数百平方公里^[22]。肖尔布拉克组主要由晶粒白云岩构成(图1d), 恢复原岩结构后可知为鲕粒白云岩(图1e), 厚53 m, 占地层厚度近80%, 顶部覆盖泥质泥晶白云岩。鲕粒白云岩发育粒间孔为主(图1e), 少量铸模孔和生屑体腔孔。储层孔隙度主要分布于2%~4%, 最大4.8%, 平均孔隙度为2.4%, 物性总体偏差。测井解释显示几无Ⅰ类

储层发育, Ⅱ类储层在鲕粒云岩段占比小于10%。大规模的鲕滩沉积本具有发育规模优质储层的潜力, 但钻探结果显示储层质量差、不具规模性。分析显示与白云石化作用发生相对较晚有关。

岩石学和地球化学以及岩相发育特征揭示该区肖尔布拉克组鲕粒白云岩形成于浅埋藏期渗透回流白云石化作用, 有3个方面依据: ①薄片观察显示鲕粒白云岩中鲕粒间多为线接触(如图1e), 且胶结物与鲕粒阴极发光相同(图1f和g), 反映在白云石化作用之前, 已经历较强的胶结和压实作用; ②地球化学上, 鲕粒白云岩有序度高(0.8~1.0)、碳和氧同位素值弱偏负($\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = -7\text{‰} \sim -5\text{‰}$)、较高锰和低铈含量(Mn含量 $>200 \times 10^{-6}$, Sr含量 $<100 \times 10^{-6}$)、铈同位素接近海水值、稀土配分同海水, 代表浅埋藏成岩环境; ③分布上, 鲕粒白云岩发育于塔中平台区, 北邻满加尔洼陷, 南接塔西南古隆起, 靠近古隆起处潮坪相泥

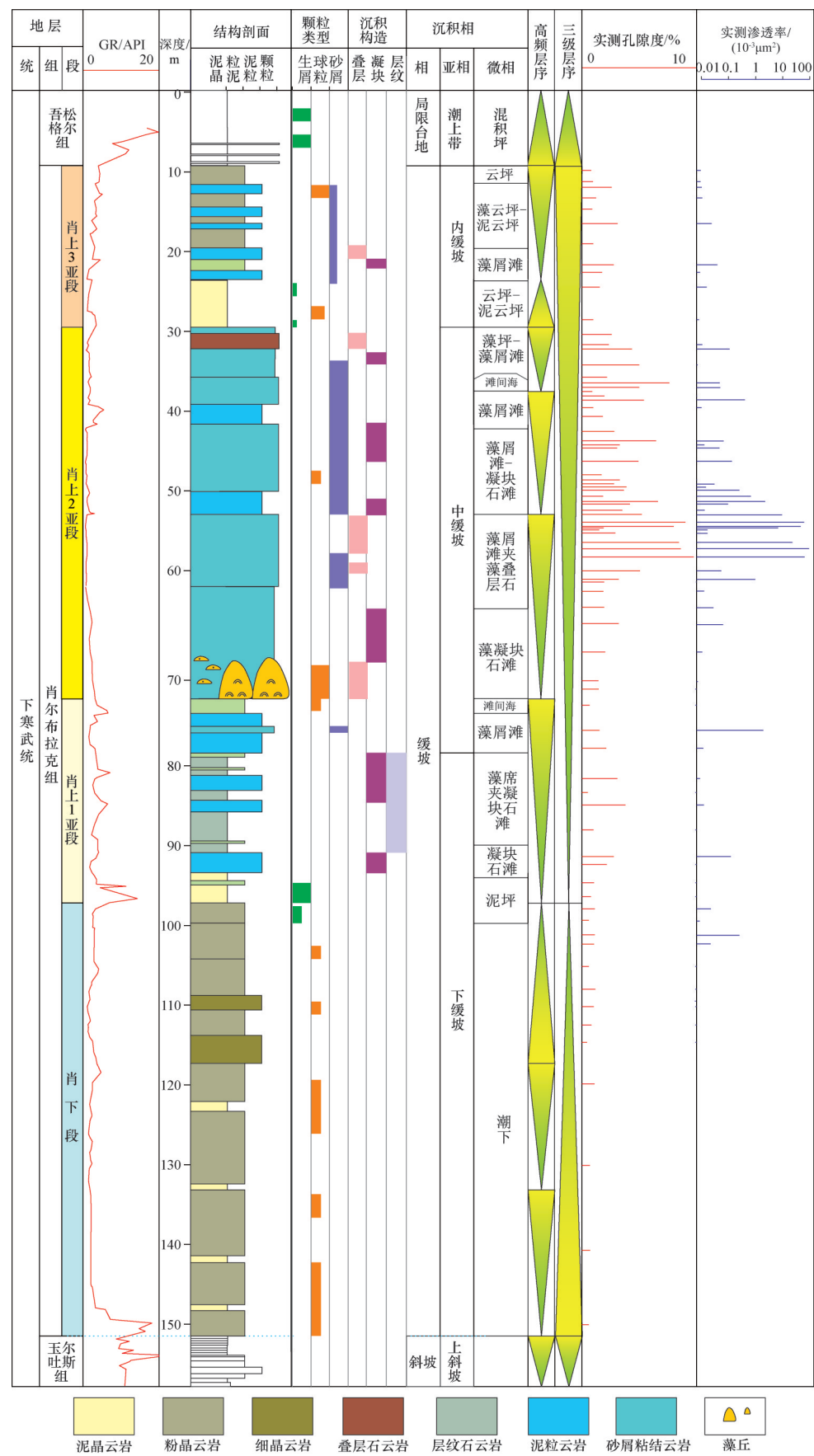


图2 塔里木盆地苏盖特剖面肖尔布拉克组沉积储层综合柱状图

Fig. 2 Sedimentary reservoir column of Xiaerbulake Formation on Sugaite outcrop, Tarim Basin

质泥晶云岩比例升高,满足渗透回流发育的背景。

由于白云石化作用发生较晚,鲕粒抗压实能力弱,更长时间的胶结和压实改造导致孔隙度显著降低(图1e)。面孔率统计可知,由于浅埋藏压实和胶结作用导致的粒间孔减小量近15%,显著降低储层质量。

更有甚者,由于白云石化作用缺位导致鲕滩储层孔隙几乎完全损失,如四川盆地齐岳山剖面飞仙关组。该剖面发育厚达30 m、侧向延伸15 km的鲕滩沉积^[24],由于未经历白云石化作用改造,粒间孔被完全充填,表现为两种形式:一种是鲕粒经渗流带大气水胶结物固化后,粒间孔被埋藏期压溶作用产生的方解石完全充填(图1h);另一种是鲕粒未发生暴露,海底胶结后进入埋藏期发生塑性变形,导致粒间孔完全损失(图1i)。反面上证明了白云石化作用缺位,导致厚达数十米的鲕粒灰岩基本不发育储层(图3)。

1.3 埋藏期白云石化作用对孔隙演化的两面性

埋藏期云化作用对孔隙演化的影响受原岩性质控制,以塔里木盆地永安坝剖面下奥陶统蓬莱坝组为例。

永安坝剖面位于巴楚隆起西缘,蓬莱坝组中部发育厚度约200 m的白云岩,夹少量灰岩,横向延伸可达上百公里^[25],规模较大。白云岩以晶粒白云岩为主,夹少量叠层石云岩。细中晶白云岩晶间孔和晶间溶孔发育(图4a,b),孔隙度可达10.42%,平均孔隙度4.23%,最大渗透率 $337.83 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率 $15.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,可构成优质储层;粗晶白云岩和粉细晶白云岩基质孔隙欠发育(图4c),基本不构成有效储层。构成优质储层的细中晶白云岩仅占白云岩段约30%,占比近40%的粗晶白云岩储层相对欠发育,不同类型白云岩发育储层的潜力差异与白云石形成过程有关。

蓬莱坝组白云岩一直被认为是埋藏白云岩成因^[25],但岩石学和地球化学分析显示其并非埋藏期一次性形成,至少存在两种成因:①准同生期形成的白云岩在埋藏期进一步重结晶而成(称为Ⅰ型埋藏白云岩),主要为中-细晶白云岩;②灰岩在埋藏期直接交代而成(称为Ⅱ型埋藏白云岩),主要为粗晶白云岩。两种白云岩具相似的地球化学特征,随有序度升高,具氧同位素值降低、锶同位素值升高、锶含量降低、锰含量升高的趋势,代表典型的埋藏白云岩特征^[26],揭示两种白云岩最后的云化流体来源可能一致。但岩石学上两种白云岩存在显著的差别:Ⅰ型埋藏白云岩的白云石排列明显受原岩组构控制(图4a,b),揭示其经历埋藏云化之前已经是白云石,埋藏云化导致了先期白

云石的重结晶,因此晶体排列受原岩组构控制;而Ⅱ型埋藏白云岩的白云石不受先期组构约束,晶体内部见颗粒结构(图4c),白云石化始自于残留粒间孔或缝合线(如图4d),且原颗粒和胶结物阴极发光特征均一,代表埋藏期颗粒灰岩被白云石直接交代而成。

尽管两种白云岩初始都为颗粒沉积物,但由于云化作用过程不同导致白云岩结构和储层物性差异(如图5)。Ⅰ型埋藏白云岩在埋藏云化作用改造前已经历了准同生云化作用,粒间孔和粒内溶孔得以较大程度的保存,并且在经历埋藏云化后仍得以继承,只是形态上转变为晶间(溶)孔(图5)。相比之下,Ⅱ型埋藏白云岩主要表现为对先期颗粒灰岩残留孔隙的充填作用(图5),造成原储层规模的减小。

相似特征见于川西北地区栖霞组,细中晶白云岩中以晶间孔和晶间溶孔为主要储集空间^[27],但恢复原岩结构后可知晶间溶孔是继承自原粒内溶孔和粒间溶孔(图4e,f),属Ⅰ型埋藏白云岩,储层主体主要由于经历了早期白云石化作用而继承自准同生期形成的孔隙,并非由埋藏白云石化作用直接形成。

实例对比分析可知,规模白云岩储集层孔隙的主体是继承自早期基质孔隙,早期云化作用是基质孔隙能否保存的关键,是白云岩储集层规模化发育的保证。(准)同生期白云岩即使经历埋藏期白云石化作用改造,也多表现为白云石的重结晶和孔隙类型的转换,对储层物性的影响有限。而如果未经历(准)同生云化作用的孔隙性灰岩,埋藏期云化交代作用更多是表现为对孔隙的充填破坏,会显著影响原储层的规模性。总之,(准)同生云化作用是白云岩储层规模化发育的关键因素。

2 溶蚀作用对储层优质化发育的必要性

虽然不排除白云石化作用可形成部分孔隙,但其不足以直接形成优质储层,均需溶蚀作用改造以提升其储层质量,其中准同生和表生溶蚀作用是重要机制。

2.1 准同生溶蚀对储层物性优化起决定性作用

准同生溶蚀改造对储层物性的优化起决定性作用,以鱼洞梁剖面下三叠统飞仙关组为例。

鱼洞梁剖面位于川西北地区江油市境内,处于“开江梁平”海槽西侧台地边缘,储层发育于飞仙关组二段上部,储集岩主要有鲕粒白云岩、晶粒白云岩和藻纹层白云岩。其中鲕粒白云岩以铸模孔和粒间孔为主要储集空间,少量膏模孔(图6a,b),孔隙度最大可达27%,

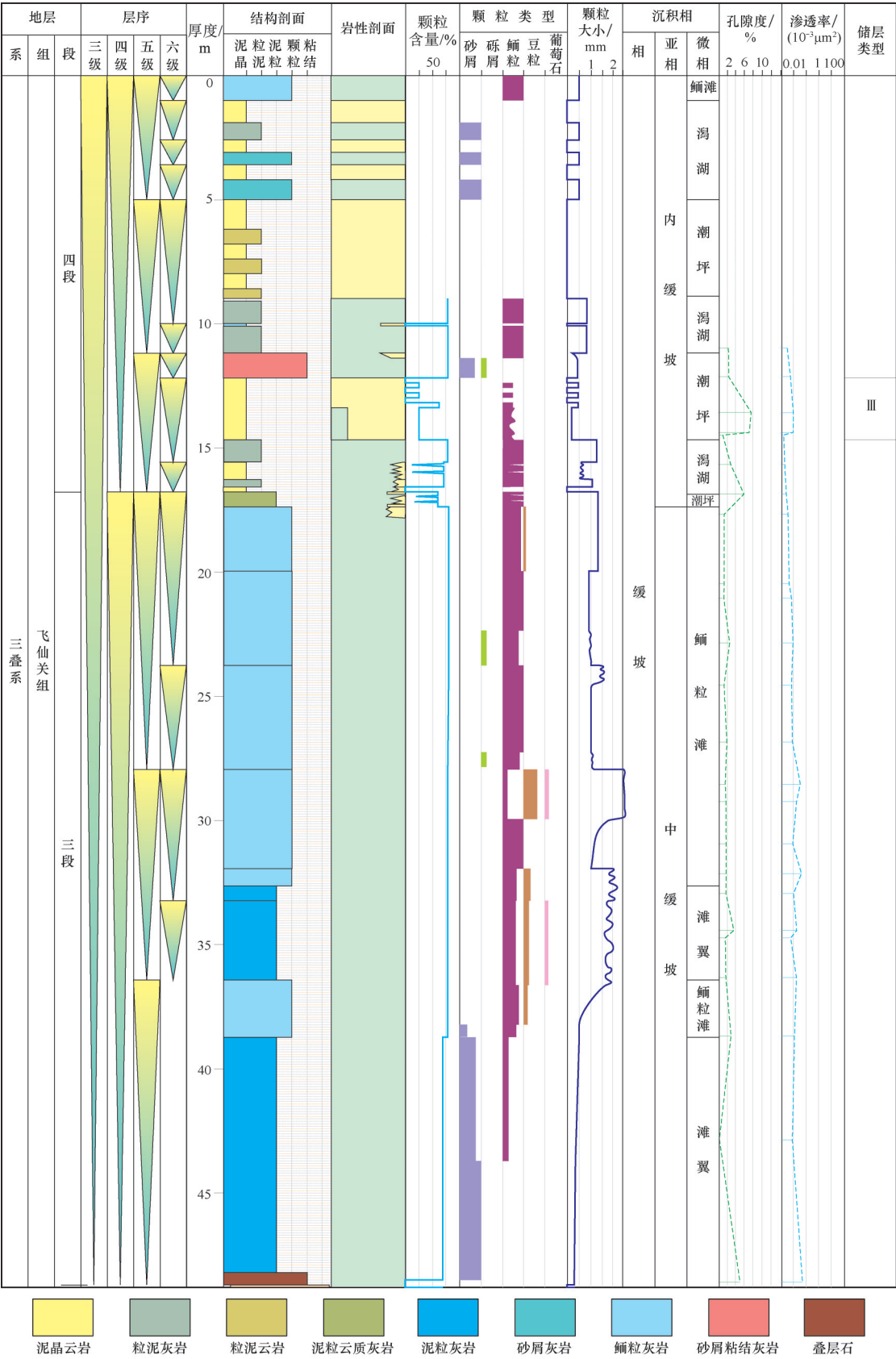


图 3 四川盆地齐岳山剖面飞仙关组上段沉积储层综合柱状图

Fig. 3 Sedimentary reservoir column of the upper Feixianguan Foramtion on Qiyueshan outcrop, Sichuan Basin

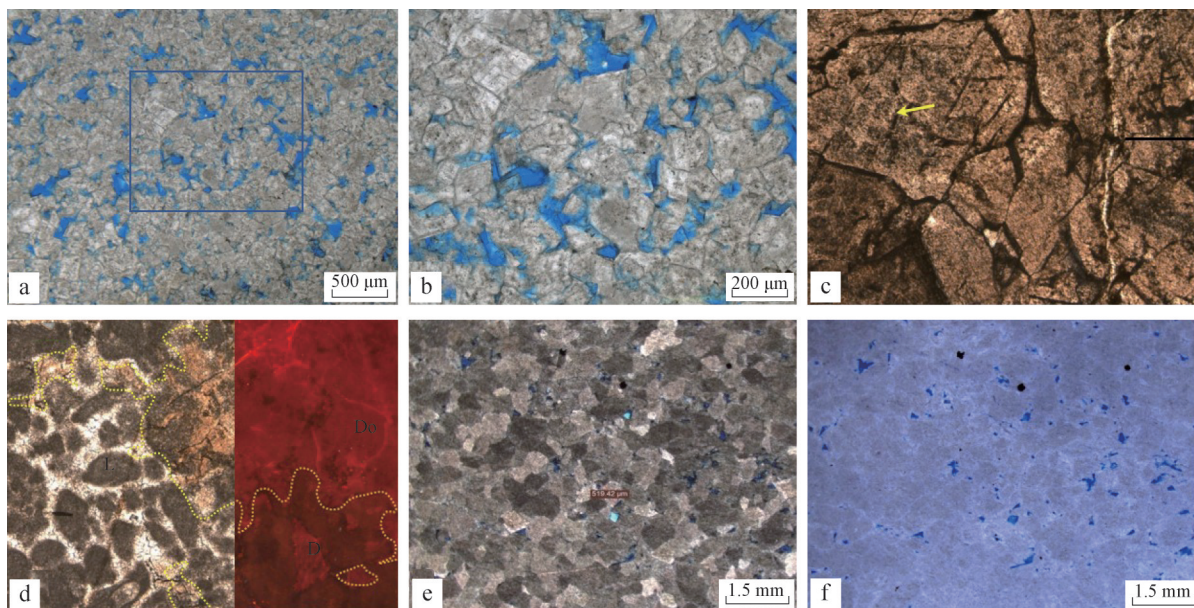


图4 埋藏白云岩典型照片

Fig. 4 Typical micrographs of dolomites in burial

a. 细晶白云岩,晶间溶孔发育,永安坝剖面蓬莱坝组,蓝色铸体,单偏光;b. 细晶白云岩,注意白云石排列受原岩结构控制,现晶间孔为粒内溶孔转换而成,永安坝剖面蓬莱坝组,视域见a中方框,蓝色铸体,单偏光;c. 粗晶白云岩,白云石晶体内可见颗粒结构(黄色箭头),永安坝剖面蓬莱坝组,单偏光;d. 云质砂屑灰岩,颗粒结构清晰,部分发生白云石化(Do),左侧为普通薄片,右侧阴极发光照片显示云化部分发橘黄色光,可见云化自粒间孔开始,永安坝剖面蓬莱坝组;e. 中晶白云岩,半自形-他形,晶间孔发育,蓝色铸体薄片,栖霞组二段,矿2井,埋深2 423.55 m;f. 视域同e,光源与薄片间加滤纸进行原岩恢复后可见明显的颗粒结构,晶间孔实为粒间孔,蓝色铸体,单偏光。

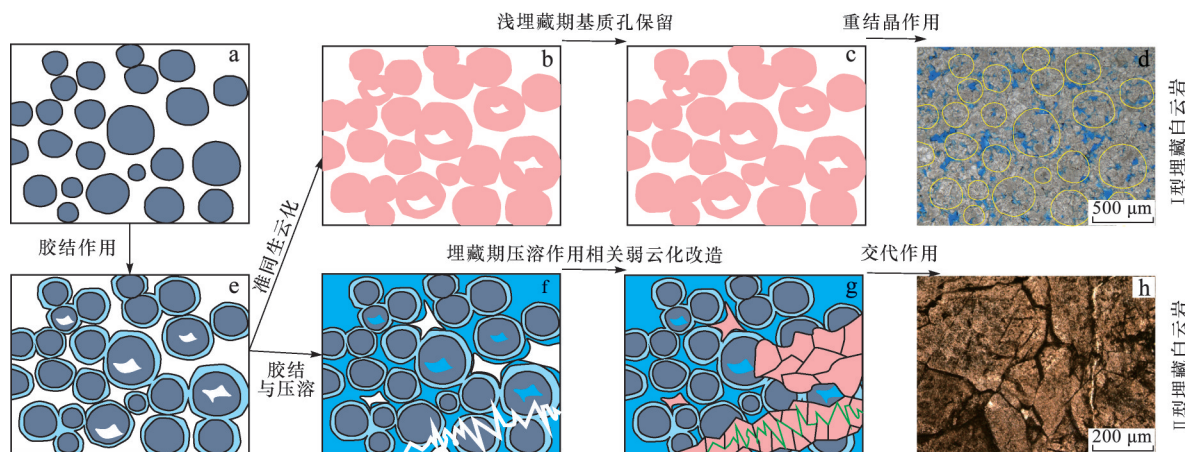


图5 埋藏白云石化路径对储层发育的控制模式

Fig. 5 Control model of dolomitization in burial on reservoir development

渗透率可达 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [28], 受孔隙类型变化控制, 渗透率垂向上呈旋回性变化, 粒间孔为主的鲕粒云岩比粒内溶孔为主的鲕粒云岩渗透率更高 [28]。藻纹层白云岩以发育孤立的窗格孔和鲕粒铸模孔为主 (图 6c), 为高孔低渗。晶粒白云岩由 $80 \sim 100 \mu\text{m}$ 的自形白云石晶体构成, 以晶间孔为主, 孔隙度可达 23 %, 渗透率达 $22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔渗相关性好。储层段中鲕粒云岩储层占比可达 90 %。同类型储层沿所在台缘同层位还发现了龙岗和元坝等大型气田, 为典型的规模优质储层,

为白云石化作用和溶蚀作用相匹配的结果。

首先, 薄片观察可知储层段粒间孔和早期的粒内溶孔和膏模孔基本全部得到保留, 未经历强烈的压实压溶改造, 而飞二段下部鲕粒灰岩则胶结致密, 仅发育少量孤立粒内溶孔, 不构成有效储层, 揭示了准同生期白云石化作用发挥了重要作用。

对于飞二段白云岩的白云石化作用机制, 前人多认为是渗透回流模式 [29-32], 但该模式更适用于海槽东侧台地边缘。沿海槽西侧台地边缘发育的鲕滩复合体

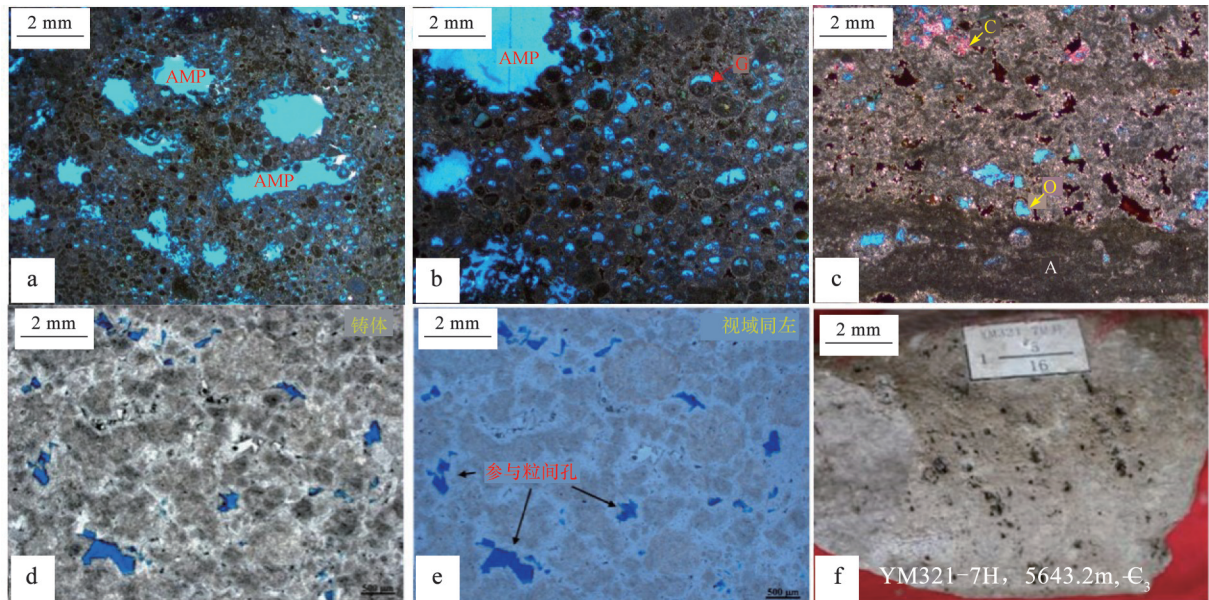


图6 四川和塔里木盆地白云岩溶蚀改造典型照片

Fig. 6 Typical micrographs showing the features of dolomite dissolution in the Sichuan and Tarim Basins

a. 鲕粒云岩,发育膏模孔(AMP)和鲕粒粒内溶孔,鱼洞梁剖面,飞二段,铸体薄片,单偏光;b. 鲕粒云岩,发育铸模孔和膏模孔,鱼洞梁剖面,飞二段,铸体薄片,单偏光;c. 藻纹层云岩,发育鸟眼孔,鱼洞梁剖面,飞二段,铸体薄片,单偏光;d. 中晶白云岩,白云石为半自形-自形,晶间溶孔发育,英买321井,蓬莱坝组,埋深5 382.5 m,铸体片,单偏光;e. 视域同d,为光源与薄片间加滤纸进行原岩结构恢复照片,见原岩颗粒幻影,晶间溶孔原为粒间溶孔,铸体薄片,单偏光;f. 中晶白云岩,溶蚀孔洞发育,英买321-7H井,上寒武统,埋深5 643.2 m,岩心照片

规模相对东侧台缘较小^[28-29],台内缺乏大规模膏盐岩,不利于渗透回流白云石化作用发生,分析认为是潮汐泵吸作用下的海水白云石化作用^[28],依据有四:①为开阔台地,台内未受限,不具备渗透回流的海水浓度差;②沉积学和岩石学特征揭示旋回上部鲕滩中夹数层潮坪相藻纹层白云岩和晶粒白云岩,且鲕粒白云岩中可见长方形的膏模孔,指示可能为蒸发泵成因;③地球化学上,有序度低(0.58)、碳同位素值弱偏正($\delta^{13}\text{C} = 1.88\text{‰}$)、氧同位素值弱偏负($\delta^{18}\text{O} = -3.22\text{‰}$)、略高铍含量(180×10^{-6})、铍同位素值(0.707 5),指示为准同生期蒸发环境;④开阔台地背景下台地边缘上的潮坪环境,在潮汐或蒸发泵吸作用下,可驱动浅层海水而使沉积物发生白云石化作用^[33-35]。岩石学证据也揭示白云石化作用发生较早,典型现象包括:①准同生期岩溶系统为渗流白云石粉屑充填^[36-37];②鲕模孔周缘的等厚环边胶结物均已完全云化;③充填于鲕模孔内的细粒白云石晶体构成了示顶底构造;④高频层序格架内尚有灰岩层夹于白云岩之中^[28]。以上均符合潮汐泵吸作用下的海水白云石化作用的解释,发生于(准)同生阶段,有利于对孔隙的保存。

此外,诚然白云石化作用对储层孔隙保存发挥了重要作用,但不足以决定储层的规模优质发育,层序界面相关的准同生期溶蚀作用发挥了关键性作用。

孔隙类型及与层序的密切关系揭示准同生溶蚀作用对储层质量提升的贡献非常大。尽管现今储层段孔隙度大于2%的储层占比可高达90%,但以原生粒间孔为主的储层段占比仅约50%,溶蚀作用形成的粒内溶孔和膏模孔在储层中占有重要地位。结合高频层序分析可知储层段发育多个溶蚀段和方解石胶结段,为鲕滩在层序界面处暴露发生溶蚀作用,溶蚀物质向下运移到渗透率低的藻纹层云岩中发生沉淀的结果。由于藻纹层云岩的遮挡作用,导致其下部的鲕粒云岩溶蚀改造相对较弱,物性明显较上部鲕粒云岩储层更差^[28]。统计显示早期接受溶蚀改造与未接受溶蚀改造的储层孔隙度差可达8%,显示了层序界面相关溶蚀作用改造对于提升储层物性和规模性的重要意义。

2.2 表生溶蚀可显著改善白云岩储层物性

表生期大气水溶蚀作用可改善白云岩储层物性,以英买32井区白云岩潜山储层为例。

英买32井区潜山主体为寒武系-奥陶系白云岩,上覆下白垩统卡普沙良群泥岩,经历了长时期的暴露溶蚀改造。潜山区储集岩主要为晶粒云岩(图6d,e),孔隙以晶间孔、晶间溶孔和溶蚀孔洞为主。原岩结构恢复可知,晶间孔/晶间溶孔主要继承自粒间溶孔(图6e)。溶蚀孔洞直径分布于2~6 mm,明显大于岩石组

构,表现出沿层理和溶缝呈串珠状分布的特点(图6f),为表生岩溶作用对先期基质孔隙扩溶而成。

取心段统计显示,孔洞发育段面洞率一般在3%~12%,实测孔隙度范围0.81%~12.80%,平均孔隙度2.82%;基质渗透率分布范围 $(0.009\sim57.600)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $5.030\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,明显优于基质孔段。测井解释结果揭示,白云岩潜山储集层在不整合面以下50 m范围内溶蚀孔洞集中发育(图7),为油气主要产出层段,受不整合面控制的特征明显。

磨溪气田下寒武统龙王庙组也显示,孔洞发育段厚度与油气产能关系密切(图8),靠近不整合面处孔洞发育段产能最高,与英买32井区开发特征一致,揭示潜山岩溶改造对于白云岩储层物性改善的重要性。

此外,白云岩潜山储层受先期储层孔隙发育程度的控制明显。溶蚀孔洞富集带主要集中在原孔隙较发育的层段,而原先较致密的层段,在暴露溶蚀改造后仍较致密。英买32井区的开发现状已证实,潜山区仍存在众多低渗隔挡层影响流体流动,而这些低渗层均为致密泥粉晶白云岩,先期孔隙即欠发育。

另外,除准同生和表生大气水溶蚀作用外,埋藏热液活动、TSR(硫酸盐热化学还原反应)以及构造活动也可以造成储层质量的局部改善^[15,17-18],如普光气田飞仙关组、中古9井蓬莱坝组、川西北栖霞组-茅口组^[27,38]等,但也常造成孔隙的充填破坏,如塔东地区鹰山组,与成岩体系开放状态、流体性质等因素有关,可构成规模优质储层形成的补充条件。需要指出的是,

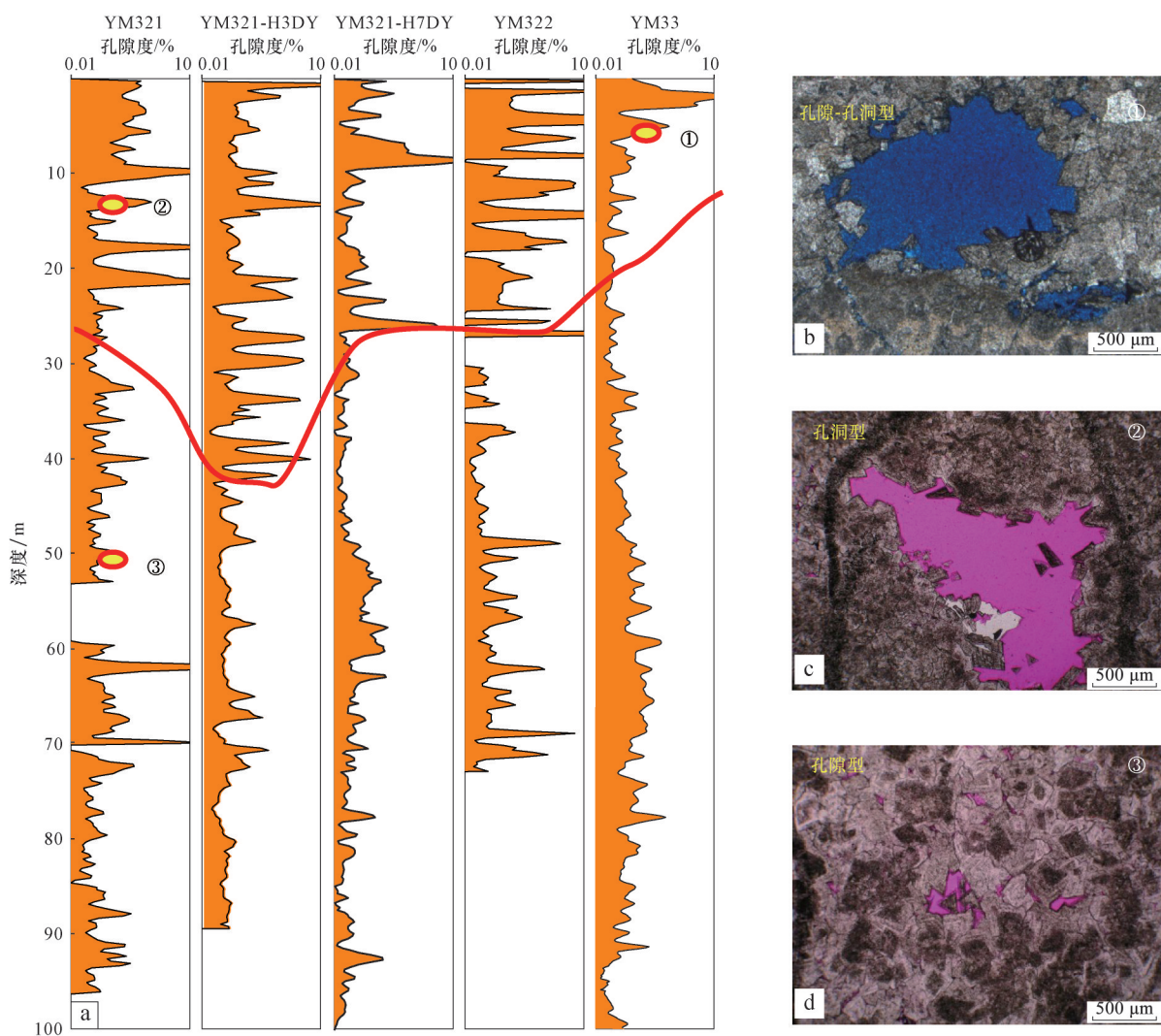


图7 塔里木盆地英买32井区潜山储层孔隙度分布(红线表示溶蚀孔洞集中发育段底界)

Fig. 7 Porosity distribution of buried-hill reservoirs in Well Yingmai 32, Tarim Basin (the red line representing the bottom of intensive development of dissolved pores and vugs)

a. 测井解释孔隙度曲线多井对比; b. YM33井, 细晶白云石, 块次1-1/5, 铸体, C_3 ; c. YM321井, 细晶白云石, 埋深5 342.89 m, 铸体薄片, O_p ; d. YM321井, 细-中晶白云石, 埋深5 380.15 m, 铸体, O_p

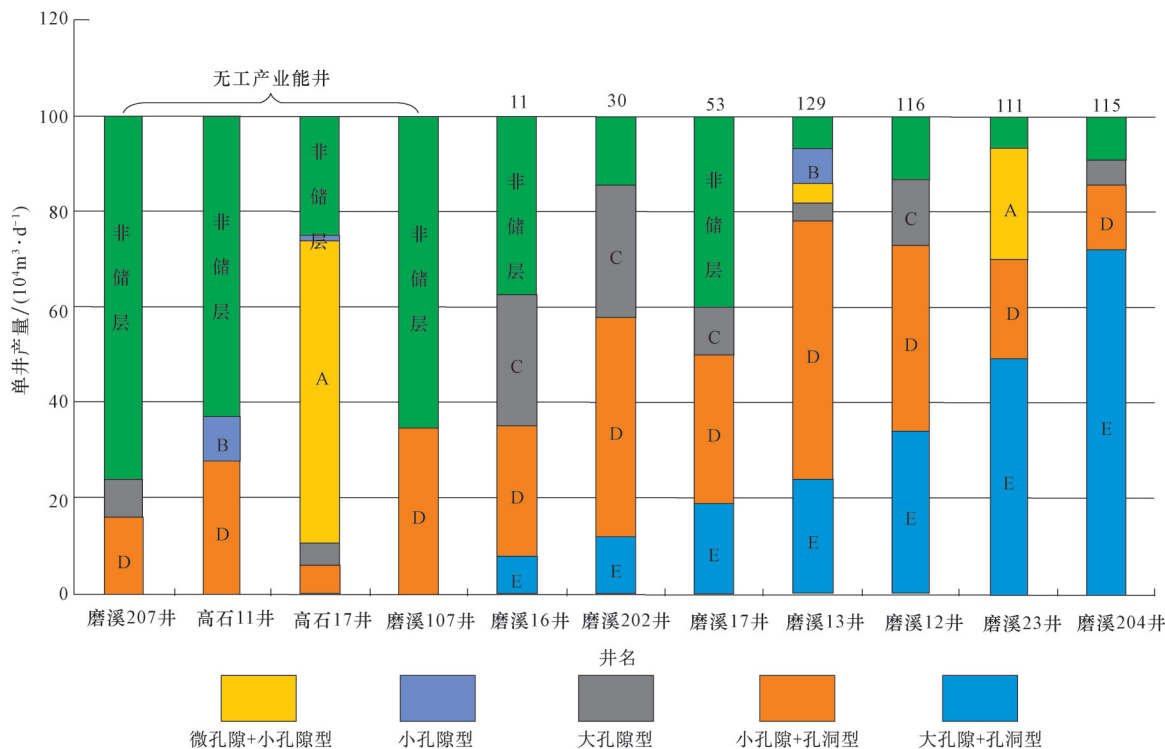


图8 四川盆地磨溪气田龙王庙组孔洞段发育厚度与产量关系

Fig. 8 Histogram showing the relationship between the thickness of vuggy section and production of the Longwangmiao Formation in Moxi gas field, Sichuan Basin

虽然埋藏溶蚀可形成一定量的新增孔隙,但多表现出以构造或断裂产生孔隙空间为主,埋藏溶蚀改造的新增孔隙量有待进一步厘定,同时埋藏溶蚀也表现出受先期储层的控制,一定程度上具有相控性,前人已多有论述,此处不再赘述。

3 云化作用与溶蚀作用匹配性及规模优质白云岩储层发育规律

前述可知,尽管溶蚀作用可新增大量溶孔和溶蚀孔洞,是保证储层优质性的重要因素,但如果未经云化作用及时保护的话,孔隙在埋藏期也难以幸存。因此,规模优质白云岩储层发育的关键在于溶蚀作用和云化作用的匹配性,存在三种地质过程:(准同生)云化伴生溶蚀型、埋藏云化继承型和后生溶蚀改造型(图9)。

3.1 (准同生)云化伴生溶蚀型及有利发育背景

云化伴生溶蚀型,指经微生物、海水或蒸发泵等准同生云化作用改造的同时,或稍后经历了层序界面相关的准同生溶蚀作用改造。准同生溶蚀作用配合云化作用使得在原生孔基础上形成更多次生孔隙,并在埋藏期得以保存(图9a—d)。

该类储层的规模优质发育主要受影响准同生云化作用和溶蚀作用发生的因素控制:①古地理与古地貌背景——台地边缘和较稳定的继承性古隆起顶部等高地形背景的礁/丘/滩相和潮坪相;②海平面下降背景——二级层序高位域内的三级层序高位域中、后期。在二级旋回高位域内的三级高位域期间,海平面以稳定下降为主旋律,在台地边缘和继承性古隆起顶部,海平面倾向于较长期保持在礁/丘/滩相或潮坪相附近,受潮汐和蒸发作用影响,准同生云化作用易于大规模发生,并在层序末期易受强烈溶蚀作用改造,形成规模优质储层。台地边缘实例:四川盆地鱼洞梁剖面飞仙关组^[28]、龙岗气田飞仙关组、高磨地区灯影组台缘带;继承性古隆起实例如柯坪—巴楚地区肖尔布拉克组和蜀南地区嘉陵江组二段^[39]。相比之下,二级层序海侵体系域以海平面上升为主,台缘礁以加积为主,高位域晚期可在礁盖发生海水云化和溶蚀作用,发育白云岩储层,但规模相对较小,如龙岗气田长兴组。

此外,齐岳山剖面飞仙关组和塔中地区肖尔布拉克组鲕滩白云石化作用缺席或滞后且孔隙欠发育的原因可能与其无伴生微生物岩发育相关,与之相对应的齐岳山剖面飞仙关组下部^[24]和巴楚地区肖尔布拉克组^[22],微生物岩发育部位均不同程度发育准同生期白

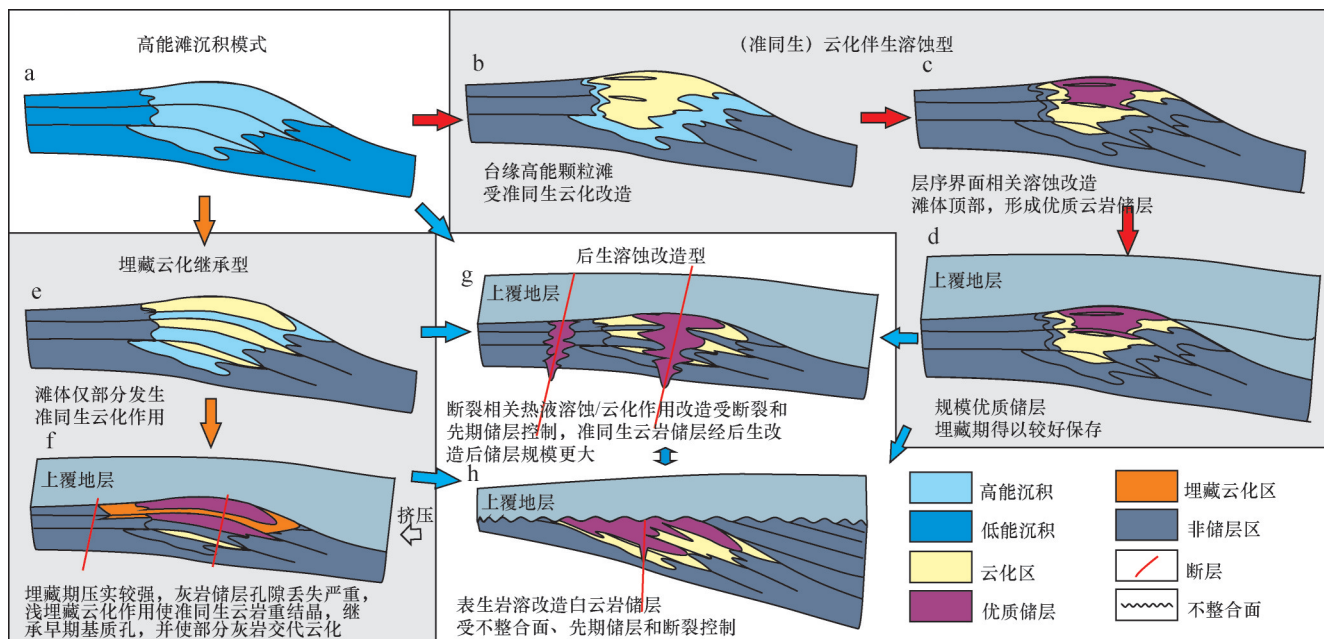


图9 云化作用与溶蚀作用匹配关系及其对储层发育控制模式(以高能滩背景为例)

Fig. 9 Schematic diagram showing the coupling of dolomitization with dissolution and its control on reservoir development (a case study on high-energy shoal facies)

云石化作用,且孔隙较发育,揭示微生物作用可能对于该类规模优质储层发育具有一定的控制作用。

3.2 埋藏云化继承型及有利发育背景

埋藏云化继承型,主要指渗透回流和I型埋藏云化等浅埋藏阶段云化作用发生晚于孔隙主要形成时期,该阶段云化作用主要贡献是及时发生以尽可能多地保存先期孔隙,作用过程中可将部分粒内或粒间孔转换为晶间(溶)孔,该类储层的规模优质发育受沉积背景和构造/埋藏史控制(图9e,f)。

沉积背景决定基质孔发育程度和浅埋藏云化前溶蚀强度,有利背景主要为海平面下降背景下伴生规模蒸发岩发育的高能丘-滩带,典型案例有罗家寨气田飞仙关组和塔东地区中、上寒武统台缘带等。先期孔隙发育程度的差异在经历了云化后仍然存在较大的差异,如同为渗透回流型白云岩储层的罗家寨气田飞仙关组和塔中地区肖尔布拉克组,前者沉积于海平面下降旋回的台地边缘,经历了强烈的暴露溶蚀改造,粒间和粒内溶孔大规模发育,在渗透回流云化改造后,孔隙得以继承;而后者沉积于二级海平面上升阶段的缓坡背景,海平面下降幅度有限,暴露弱,次生孔隙欠发育。另外,伴生大规模蒸发岩的背景可能由于富镁流体规模大、运移速率快,云化作用发生时间相对较早、速率更快,更有利于孔隙保存。

构造/埋藏史是决定浅埋藏云化发生阶段和部位

及云化前压实压溶强度的重要因素。挤压或推覆构造活动是驱动埋藏富镁流体运移的重要机制,有利于浅埋藏云化作用发生,这种情况下有利储层发育于先期准同生云化发生的相带,形成I型埋藏白云岩,如川西北栖霞组-茅口组和柯坪-巴楚地区、塔北南缘及塔中北部等地区的蓬莱坝组。如未发生准同生或浅埋藏云化改造,经长期的埋藏配合较强的构造挤压将导致强烈的压实压溶改造,致使先期基质孔大量减少,不利于规模储层发育。

3.3 后生溶蚀改造型及有利发育背景

后生溶蚀改造型,指热液或表生岩溶改造先期白云岩储层而形成,严格意义上已与云化作用无关。热液改造型储层主要表现为断控,优质储层沿断裂分布,呈栅状规模发育;表生岩溶改造型储层主要受不整合面控制,但都表现出受先期储层的强烈控制(图9g,h)。如川西北栖霞组,表现出强烈的顺层性热液改造,储层除了受断控还受相控,热液改造使储层规模更大。白云岩潜山储层的质量和规模与先期储层发育程度密切相关,先期储层经不整合面岩溶改造后,储层质量更优,如英买32井区。若白云岩潜山以孔隙欠发育的泥粉晶白云岩为主,即使经历了长期的暴露溶蚀,储层质量也较差;热液改造背景下如果先期储层不发育,热液白云岩储层的储集空间则主要来自于岩石破裂缝形成的空间。因此,后生改造型规模优质储层的分布预测,

除了关注较直接的断裂和不整合面外,还应该强调先期储层的发育,即相带、先期经历的云化作用和溶蚀作用期次。典型案例有塔里木盆地奇格布拉克组、英买32井区白云岩潜山、塔中鹰山组,四川盆地磨溪气田龙王庙组、川东黄龙组、川西雷口坡组、川东北飞仙关组等。

需指出的是,实例中后生溶蚀改造较为常见,需厘定主控因素,以确定储层发育规律。如罗家寨气田飞仙关组也受到了埋藏溶蚀作用改造,但总体上该实例储集空间主体仍为基质孔,埋藏溶蚀作用只是对储层质量有所提高,对规模储层发育不起主要作用,故仍属埋藏云化-继承型,储层仍以相控为主要特征。

4 结论

1) 通过对塔里木和四川盆地典型实例解剖,提出了白云石化作用阶段是储层规模化的关键,越早发生越有利于孔隙的保存;溶蚀作用是提升白云岩储层质量的必要条件。

2) 指出规模优质白云岩储层发育的3种地质过程,即:①准同生期云化作用伴生溶蚀作用,称为云化伴生溶蚀型;②先期孔隙经浅埋藏云化作用改造得以保存,表现为孔隙类型的继承或转换,称为埋藏云化继承型;③先期形成的白云岩储层经后期溶蚀改造,储层物性和规模得以改善,称为后生溶蚀改造型。

3) 云化伴生溶蚀型储层对应于微生物、海水和蒸发泵白云岩,主要发育于海平面下降背景下的台地边缘和较稳定继承性古隆起顶部的高能礁/丘滩相和潮坪相。埋藏云化继承型储层对应于渗透回流和I型埋藏白云岩,储层质量和规模性受控于相带和云化前溶蚀改造的强度,规模优质储层主要发育于蒸发岩伴生的高能礁/丘滩相。后生溶蚀改造型储层兼具相控性、断控性和面控性,储层质量和规模性受先期储层发育程度的显著控制。以上认识对规模优质白云岩储层预测思路具有重要指导意义。

参 考 文 献

- [1] Zenger D H, Dunham J B, Ethington R I. Concepts and models of dolomitization[C]. TULSA, USA, SEPM Special Publication, 1980, 28: 1-320.
- [2] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 545-554.
Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 545-554.
- [3] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [4] Bush P R. Some aspects of the diagenetic history of the sabkha in Abu Dhabi, Persian Gulf[C]//Purser B H. The Persian Gulf, New York, Springer-Verlag, 1973, 395-407.
- [5] Land L S. The origin of massive dolomite[J]. Journal of Geological Education, 1985, 33(2): 112-125.
- [6] Adams J E, Rhodes M L. Dolomitization by seepage refluxion[J]. AAPG Bulletin, 1961, 44: 1921-1920.
- [7] Mattes B W, Mountjoy E W. Burial dolomitization of the Upper Devonian Miette buildup[C]//D H Zenger, J B Dunham, R L Ethington, et al. Concepts and Models of Dolomitization, Tulsa, OK, SEPM Special Publication, 1980, 28: 259-297.
- [8] Hardie L A. Dolomitization: a critical view of some current views[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57: 166-183.
- [9] Graham R. Davis, Langhorne B. Smith Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 89: 1636-1684.
- [10] Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, et al. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures[J]. Nature, 1995, 377(6546): 220-222.
- [11] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235(1): 7-63.
- [12] Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79-2: 186-204.
- [13] Lucia F J, Major R P. Porosity evolution through hypersaline reflux dolomitization[C]//Purser, M. Tucker, D. Zenger. Dolomites, International Association of Sedimentologists Special Publication, 1994, 21: 325-341.
- [14] 沈安江, 郑剑锋, 潘文庆, 等. 塔里木盆地古生界白云岩储层类型及特征[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4): 1-9.
Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Pan Wenqing, et al. Types and the characteristics of Lower Paleozoic dolostone reservoirs in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(4): 1-9.
- [15] 赵文智, 沈安江, 郑剑锋, 等. 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, 2014, 44(9): 1925-1939.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. 2014. The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9): 1925-1939.
- [16] 刘永立, 尤东华, 等. 超深层碳酸盐岩层系硅质岩储层表征与评价——以塔里木盆地塔深6井为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 547-556.
Liu Yongli, You Donghua, Li Haiying, et al. Characterization and evaluation of chert reservoirs in ultra-deep carbonate rock formations—A case study on Well TS 6 in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 547-556.
- [17] 张君龙, 胡明毅, 汪爱云, 等. 塔里木盆地古城台缘带寒武系丘滩体沉积构型特征及储层分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 557-569.
Zhang Junlong, Hu Mingyi, Wang Aiyun, et al. Sedimentary con-

- figuration and reservoir distribution in the Cambrian mound-shoal complexes at platform margins of Gucheng area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 557-569.
- [18] 赵文智, 沈安江, 胡安平, 等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J]. *岩石学报*, 2015, 31(11): 3495-3508.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Anping, et al. A Discussion on the geological background of marine carbonatereservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(11): 3495-3508.
- [19] Murray R C. Origin of porosity in carbonate rocks [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1960, 30: 59-84.
- [20] Weyl P K. Porosity through dolomitization: Conservation-of-mass requirement [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1960, 30(1): 85-90.
- [21] Tan X C, Liu H, Li L, et al. Primary intergranular pores in oolitic shoal reservoir of lower Triassic feixianguan Formation, Sichuan Basin, Southwest China: Fundamental for reservoir formation and retention diagenesis [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(1): 101-114.
- [22] 乔占峰, 沈安江, 倪新峰, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘滩体系类型及其勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 392-402.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Ni Xinfeng, et al. Types of mound-shoal complex of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 392-402.
- [23] Petrash D A, Bialik O M, Bontognali T R R, et al. Microbially catalyzed dolomite formation: From near-surface to burial [J]. *Earth Science Reviews*, 2017, 171: 558-582.
- [24] Qiao Z F, Shen A J, Zheng J F, et al. Digitized outcrop geomodeling of ramp shoals and its reservoirs: as an example of Lower Triassic Feixianguan Formation of Eastern Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(4): 1395-1412.
- [25] 乔占峰, 沈安江, 郑剑峰, 等. 塔里木盆地奥陶统白云岩类型及其成因[J]. *古地理学报*, 2012, 14(1): 21-32.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. Classification and origin of the lower Ordovician dolostone in Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(1): 21-32.
- [26] Mazzullo S J. 1992. Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review [J]. *Carbonates and Evaporites*, 1992, 7(1): 21.
- [27] 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.
- [28] Qiao Z F, Janson X, Shen A J, et al. Lithofacies, architecture, and reservoir heterogeneity of tidal-dominated platform marginal oolitic shoal: An analogue of oolitic reservoirs of Lower Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, SW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 290-309.
- [29] 乔占峰, 李国蓉, 龙胜祥, 等. 川东北地区飞仙关组层序地层特征及演化模式[J]. *沉积学报*, 2010, 28(3): 462-470.
- Qiao Zhanfeng, Li Guorong, Long Shengxiang, et al. Characteristics and evolution model of sequence stratigraphy of Feixianguan Formation in the northeast of Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3): 462-470.
- [30] Zhao W Z, Luo P, Chen G S, et al. Origin and reservoir rock characteristics of dolostones in the early Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China: significance for future gas exploration [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2005, 28(1): 83-100.
- [31] 沈安江, 乔占峰, 余敏, 等. 基于溶蚀模拟实验的碳酸盐岩埋藏溶蚀孔洞预测方法——以四川盆地龙王庙组储层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 690-701.
- Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, She Min, et al. Prediction of burial dissolved vugs in carbonates based on dissolution simulation: A case study of the Longwangmiao Formation dolostone reservoirs, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 690-701.
- [32] Chen P Y, Tan X C, Liu H, et al. Formation mechanism of reservoir oolitic dolomite in Lower Triassic Feixianguan formation, northeastern Sichuan Basin, southwest China [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21: 3273-3274.
- [33] Yoo C M, Lee Y I. Origin and modification of early dolomites in cyclic shallow platform carbonates, Yeongheung Formation (Middle Ordovician), Korea [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 118: 141-157.
- [34] Rahimpour-Bonab H, Esrafil-Dizaji B, Tavakoli V. Dolomitization and anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the south Pars gasfield, offshore Iran: controls on reservoir quality [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2009, 33(1): 43-66.
- [35] Jiang L, Cai C F, Worden R H, et al. Reflux dolomitization of the upper Permian Changxing Formation and the lower Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China [J]. *Geofluids*, 2013, 3(13): 232-245.
- [36] Chen P Y, Tan X C, Yang H T, et al. Characteristics and genesis of the Feixianguan Formation oolitic shoal reservoir, Puguang gas field, Sichuan Basin, China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2015, 9(1): 26-39.
- [37] Yu Y, Tan X C, Chen P Y, et al. Discovery of hiatus in Feixianguan Formation and its geological implications, Sichuan Basin, SW China [J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2015, 41(6): 712-723.
- [38] Liu H, Ma T, Tan X, et al. Origin of structurally controlled hydrothermal dolomite in epigenetic karst system during shallow burial: An example from Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 1000-1011.
- [39] 乔占峰, 李国蓉, 李毅, 等. 泸州古隆起地区嘉陵江组层序特征及其对碳酸盐岩储层的控制[J]. *沉积学报*, 2008, 26(1): 92-99, 110.
- Qiao Zhanfeng, Li Guorong, Li Tao, et al. Sequence stratigraphic features and their controls on carbonate reservoirs for the Triassic Jialingjiang Formation of the Luzhou paleohigh in Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(1): 92-99, 110.