

川西中二叠统栖霞组白云岩特征与成因

韩月卿^{1,2},张军涛^{1,2},何治亮³,金振奎⁴,韩文彪⁴,高平⁵,郝运轻^{1,2},孙炜^{1,2},武重阳^{1,2}

[1. 中国石化深部地质与资源重点实验室,北京 102206;2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206;3. 中国石化集团公司,北京 100728;4. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;5. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083]

摘要: 近期在川西地区中二叠统栖霞组斩获的多个白云岩油气发现彰显了白云岩储层的油气潜力,但该组白云岩储层非均质性极强,白云岩化机制不明确,优质白云岩储层分布预测困难。研究综合分析了该组不同类型白云岩的岩石学和地球化学特征,结合沉积相背景和峨眉山大火成岩省热事件,系统总结了不同类型白云岩化作用的期次和成因。结果显示:川西地区栖霞组白云岩多为斑状或层状分布,白云石晶体以细晶为主,中-粗晶、泥-粉晶次之,伴少量鞍状白云石胶结物。泥-粉晶白云岩主要发育在栖霞组底部,白云石晶体多为半自形-他形晶,常与草莓状黄铁矿伴生,部分泥晶白云石呈球粒状、哑铃状和花椰菜状;泥-粉晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}(\text{VPDB})$ 为负值, $\delta^{18}\text{O}(\text{VPDB})$ 处于正常海水数值范围内,这些特征表明泥-粉晶白云岩可能为微生物介导作用的产物。细晶白云岩在栖霞一段和栖霞二段都有发育,其白云石晶体主要为自形-半自形晶,多具有雾心亮边结构,在阴极发光下晶体内部呈棕色-暗红色,向外过渡为亮红色后再变暗;细晶白云岩具有明显的残余粒屑结构,表明前驱岩岩性为颗粒灰岩;细晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}(\text{VPDB})$, $\delta^{13}\text{C}(\text{VPDB})$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均指示白云岩化流体为海水,可能为浅埋藏期中等盐度回流渗透白云岩化作用而成。中-粗晶白云岩多发育在栖霞二段,其白云石晶体主要为非平直晶面他形晶,阴极发光下多表现为内部暗、外部亮的特征;中-粗晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}(\text{VPDB})$ 均低于正常海水数值范围,说明受到了后期流体的改造;部分中-粗晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高于同期海水数值,呈斑状或斑马状,其溶蚀孔洞发育鞍形白云石,这些特征说明受到了来自或穿碎屑岩层热流体的直接影响; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值仍处于海水数值范围内的中-粗晶白云岩,未见鞍形白云石,可能指示细晶白云岩的重结晶或热调整。总体而言,川西地区栖霞组白云岩先后经历了同生期微生物介导白云岩化作用、浅埋藏期回流渗透白云岩化作用和晚期热流体调整改造作用,其中浅埋藏期回流渗透白云岩化作用是该区白云岩的主要成因。

关键词: 峨眉山大火成岩省;白云岩;栖霞组;中二叠统;四川盆地西部

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Characteristics and genesis of the Middle Permian Qixia Formation dolostone in western Sichuan Basin

HAN Yueqing^{1,2}, ZHANG Juntao^{1,2}, HE Zhiliang³, JIN Zhenkui⁴, HAN Wenbiao⁴, GAO Ping⁵, HAO Yunqing^{1,2},
SUN Wei^{1,2}, WU Chongyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Deep Geology and Resources, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. SINOPEC, Beijing 100728; 4. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 5. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Recent oil and gas discoveries in the Middle Permian Qixia Formation dolostone in western Sichuan Basin reveal the exploration potential of dolostone reservoirs. However, the mapping of paying dolostone reservoirs has been difficult due to their high heterogeneity and puzzling dolomitization mechanisms. In this study, the lithological and geochemical characteristics of different types of dolostone in the Qixia Formation of western Sichuan Basin are comprehensively analyzed and combined with sedimentary facies and thermal events of the Emeishan Large Igneous Province (ELIP) to summarize the diagenetic stages and genetic mechanisms of the dolostones. The results show that the Qixia Formation in western Sichuan Basin hosts mainly porphyritic or stratified dolostone that are mostly fine crystalline, sometimes medium to coarse crystalline, or micritic to very fine crystalline, occasionally with some saddle shaped

收稿日期:2022-03-03;修订日期:2022-11-11。

第一作者简介:韩月卿(1992—),女,硕士、副研究员,沉积储层。E-mail: hanyq2018_syky@sinopec.com。

通讯作者简介:金振奎(1963—),男,博士、教授,沉积学和储集层成岩。E-mail: jinzhenkui@188.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010201)。

dolomite cement. The micritic to very fine crystalline dolostones, largely developed at the bottom of the Qixia Formation, consist of mainly subhedral-anhedral crystalline often accompanied by framboidal pyrite. Some micritic dolostones consist of sphaerolitic, dumbbell- or cauliflower-shaped crystalline, and have negative $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) values and $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) values in the range of that of normal seawater, all indicating possible products of microbial-mediated dolomitization process. Fine crystalline dolostones are developed both in the first and second members of the Qixia Formation, where they consist of euhedral to subhedral crystalline with mist-centered bright-edge structure and show change of color from brown-dark red inside to bright red outside and then dark again under cathode luminescence. Their obvious residual grain structure suggests a grainstone origin and their $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB), $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) as well as $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values all indicate seawater as the dolomitization fluid possibly formed by reflux seepage dolomitization with medium salinity during shallow burial period. The medium to coarse crystalline dolostones are generally developed in the second member of the Qixia Formation. They contain mainly anhedral nonplanar crystalline which are dark from inside and bright to the outside under cathodoluminescence. Their $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) values are lower than that of the normal sea water, indicating a modification by later fluids. Some medium to coarse crystalline dolostones with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values higher than that of seawater of the same period consist of porphyritic or zebra-like crystalline and often have saddle dolomites in vugs. These characteristics indicate a direct influence of thermal fluids that originated from or passed through certain clastic rocks. Those with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values still within the seawater range but with no saddle-shaped dolomites being observed may be the products of recrystallization or thermal adjustment of fine crystalline dolostones. In general, the dolostones of the Qixia Formation in western Sichuan Basin are mostly likely the results of a successive syngenetic microbial-mediated dolomitization, shallow burial reflux seepage dolomitization, and late thermal fluid modification, among which shallow burial reflux seepage dolomitization could be the main genetic mechanism.

Key words: Emeishan Large Igneous Province, dolostone, Qixia Formation, Middle Permian, western Sichuan Basin

引用格式: 韩月卿, 张军涛, 何治亮, 等. 川西中二叠统栖霞组白云岩特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 75-88. DOI: 10.11743/ogg20230106.

HAN Yueqing, ZHANG Juntao, HE Zhiliang, et al. Characteristics and genesis of the Middle Permian Qixia Formation dolostone in western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 75-88. DOI: 10.11743/ogg20230106.

“白云岩问题”已困扰地质学界 200 余年, 至今仍悬而未决^[1-2]。科学家先后提出了微生物介导^[3]、混合水^[4]、渗透回流^[5]、萨布哈^[6]、断控热液^[7]等不同模式来解释不同地区不同类型的白云岩。白云岩是重要的油气储集层, 半数碳酸盐岩油气藏发育于白云岩中。中国的碳酸盐岩油气藏, 包括威远、靖边、普光、元坝及安岳-磨溪等大型气田储层都属于白云岩储层, 因此对其研究更为重要^[8]。

近年来, 川西地区栖霞组也发现了优质白云岩储层, 获得了油气突破, 彰显了白云岩巨大的勘探潜力。中国石油在川西南平落坝地区(平探 1 井)^[9]、川西北双鱼石区块的栖霞组白云岩储层都获得了高产工业气流^[10]。但是栖霞组白云岩分布具有很强的非均质性, 厚度变化大, 矿 2 井栖霞组白云岩总厚 47 m, 相邻的矿 3 井中却未见白云岩发育^[11]。因此, 川西栖霞组油气勘探关键在于认识白云岩的分布规律, 进而探索白云岩的形成机制。

关于四川盆地栖霞组白云岩的成因已有大量研究, 但争议很大, 主要的 5 种成因假设分别是热液白云岩化^[12-14]、埋藏白云岩化^[15]、玄武岩淋滤白云岩化^[16]和准同生期白云岩化^[17-18]。其中热液白云岩化成因是目前的主流观点, 因为白云岩储层中常见斑马状构造, 溶蚀缝洞中充填鞍状白云石、石英和萤石等热液矿物, 断裂可作为富镁热液流体的运移通道^[12-13]。但是, 部分白云岩层状发育, 与断裂关系并不明显, 地球化学分析显示白云岩化流体与同时期海水相似, 与传统的热液差异较大, 所以有学者认为大部分白云岩形成于准同生期^[17-18]。对白云岩的成因和主控因素的认识存在分歧, 不利于了解其储层分布规律, 也一定程度上制约了勘探进程。

基于川西露头剖面和钻井实测, 通过薄片观察、阴极发光、扫描电镜、碳-氧同位素、锶同位素测试等方法, 本研究系统梳理了川西不同位置栖霞组白云岩空间展布特征, 结合矿物岩石学和地球化学特征划分了

栖霞组白云岩的类型,详细探讨了不同类型白云岩的成因机制,综合认为栖霞组白云岩是多期多类型白云岩化流体叠加作用的结果。

1 地质背景

四川盆地中二叠统分为早期沉积的栖霞组和晚期沉积的茅口组。在栖霞组沉积早期,四川盆地经历了大规模海侵,水体相对较深,主要以开阔台地相为主^[19],但是川西地区处于台地到斜坡的过渡带,局部地势稍高,发育少量台缘滩,广海一侧发育斜坡相。栖霞组沉积中晚期海平面下降,发育高位体系域,川西地区开始大面积发育台地边缘沉积(图1a)。栖霞(栖霞组)一段以深灰色含生屑灰泥灰岩、灰泥生屑灰岩为主,夹薄层泥晶-细晶白云岩和灰质泥岩,下部泥质含量较高,见腕足类、介壳类、有孔虫等生物碎屑。栖霞二段水体浅,能量高,阳光和氧气充足,生物生长迅速,进入大规模成滩期;岩性以浅灰色、灰白色亮晶生屑灰岩、灰泥生屑灰岩、云质灰岩、白云岩为主(图1b),见珊瑚、苔藓虫、有孔虫、藻类等生物碎屑。在茅口组沉积期,四川盆地又一次转变为相对深水的沉积环境。茅口组沉积末期,

峨眉山地幔柱不断上涌造成四川盆地差异抬升,使得中二叠系地层暴露风化,遭受淋滤剥蚀,茅口组广泛发育岩溶地貌^[20]。同时,峨眉山大火成岩省热事件(ELIP)也影响了四川盆地中二叠统白云岩化过程。

川西地区栖霞组白云岩主要分布在大邑—广元一线,但厚度变化很大,分布非常不均匀(图2)。研究区最北边的双汇剖面栖霞一段中部斑状云质灰岩厚约7 m,栖霞二段上部发育24 m厚的斑状云质灰岩,云斑内发育方解石晶洞,基岩为深灰色生屑灰岩。上江沟剖面栖霞组斑状云质灰岩和层状白云岩厚达80 m,单层厚度变化较大。栖霞一段以斑状云质灰岩为主,与生屑质灰泥灰岩互层,单层厚1~4 m;栖霞二段斑状云质灰岩最厚可达30 m,还夹有4 m厚的层状白云岩,基岩以浅灰色亮晶生屑灰岩为主。水根头剖面栖霞组由下向上发育灰白色薄层白云岩和多套斑状云质灰岩,与生屑质灰泥灰岩互层,总厚约30 m。栖霞一段斑状云质灰岩单层厚1~3 m,栖霞二段斑状云质灰岩总厚度15 m,但白云岩化程度不高。北川地区栖霞一段未见白云岩发育,通口剖面栖霞二段发育20 m厚深灰色粗晶白云岩,与亮晶生屑灰岩伴生,茶坪上剖面栖霞二段见60 cm厚砂糖状白云岩和20 m厚层斑状云质灰岩,富含珊瑚、

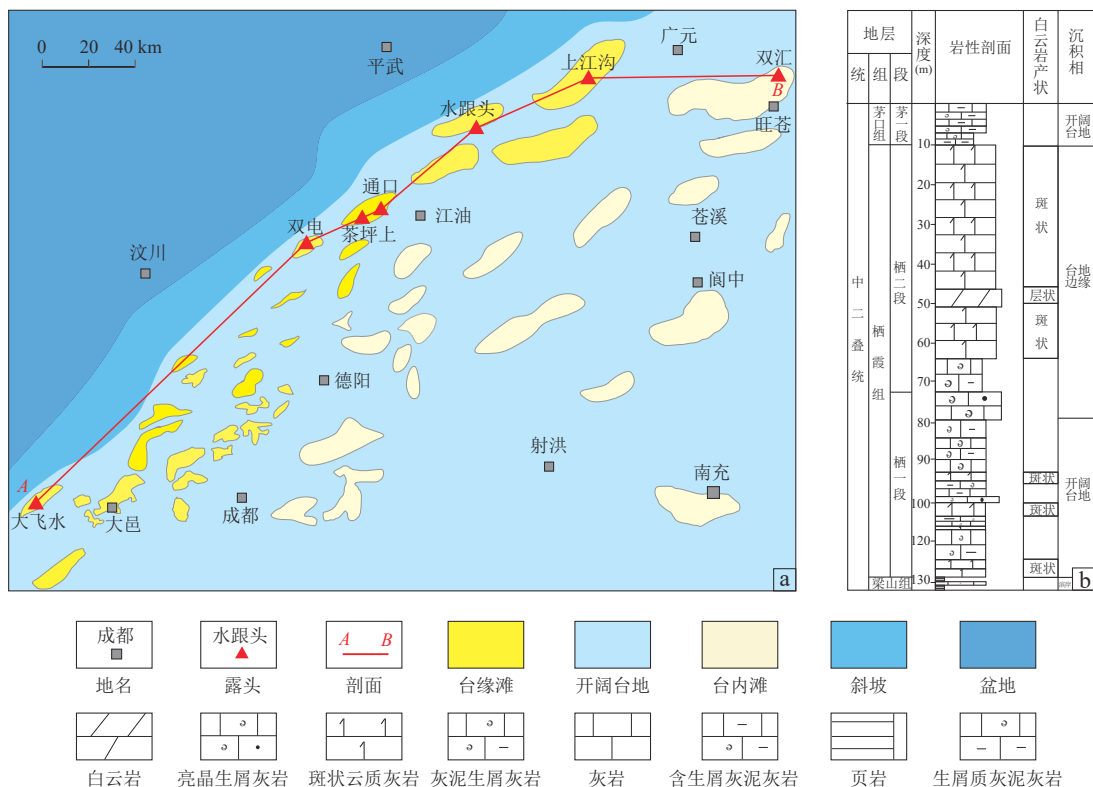


图1 川西栖霞二段沉积相平面图(a)和水根头剖面中二叠统栖霞组岩性柱状图(b)

Fig. 1 Map of the sedimentary facies in the second member of the Qixia Formation (a) and lithological column of the Qixia Formation in the middle Permian of the Shuigengtou outcrop (b), western Sichuan Basin

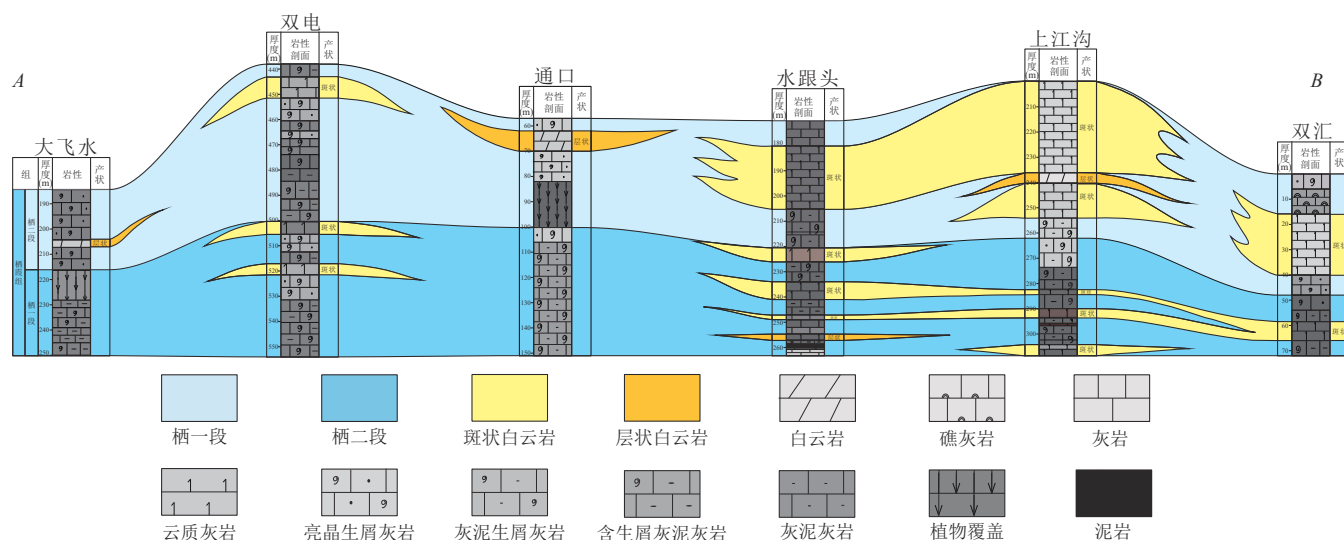


图2 川西中二叠统栖霞组白云岩分布对比(剖面位置见图1)

Fig. 2 Correlation of the Middle Permian Qixia Formation dolostones cross various outcrops, western Sichuan Basin (see Fig. 1 for the location)

腹足类、介壳类等生物化石。绵阳安县的双电剖面在栖霞一段和栖霞二段均发育浅灰色斑状云质灰岩,总厚18 m,栖霞一段斑状云质灰岩单层厚5 m左右,灰岩中可见被完全云化的四射珊瑚礁。栖霞二段斑状云质灰岩略厚,约8 m,多为藻灰岩云化或生屑体腔云化,裂缝内充填白云石。栖霞组向南至大飞水又变浅,在栖霞二段中上部发育厚3 m砂糖状云岩,表面可见斑马状裂缝,裂缝内见乳白色白云石和透明方解石胶结物。总体来看,川西栖霞组白云岩分布具有较强的非均质性。

2 岩石学特征

基于钻井岩心和野外剖面的详细观察及显微镜下分析,川西地区栖霞组按照晶体结构可划分为3种基质白云岩和1种白云石胶结物:即泥-粉晶白云岩、细晶白云岩、中-粗晶白云岩和白云石胶结物。

2.1 泥-粉晶白云岩

泥-粉晶白云岩(Md1)主要发育在栖霞一段底部,分布不连续,零星地见于川西北的部分剖面 and 钻井,如广元-上江沟、江油-水根头等剖面。每个剖面的白云岩厚度也有较大差异,上江沟剖面最厚,约2 m,水根头剖面最薄,仅70 cm;泥-粉晶白云岩多呈层状或纹层产出(图3a)。

在显微镜下,泥-粉晶白云石粒径一般小于100 μm ,晶粒结构主要为半自形-他形晶,常见黄铁矿呈星点状或集合体(图4a,b)。在扫描电镜下,可见黄

铁矿颗粒呈草莓状(图4d),部分泥晶白云石呈球粒状、哑铃状和花椰菜状(图4c,e,f)。

2.2 细晶白云岩

细晶白云岩(Md2)在栖霞一段和栖霞二段都有发育,厚度多从几米到十几米,不连续地分布于上江沟、水根头、双电、通口等剖面,一般为斑状或层状,当以斑状产出时,深灰色不规则条带状斑块为白云石,浅灰色基质为生屑颗粒灰岩(图3b)。

在显微镜下,细晶白云石晶形主要为自形-半自形晶,晶粒大小为100~250 μm 。白云石多具有雾心亮边结构,在阴极发光下,晶体内部呈棕色-暗红色,由内向外先变亮再变暗(图5a,b)。部分细晶白云石晶粒间也能见到泥-粉晶白云石。在扫描电镜下,细晶白云石具有较好的晶形,但当白云岩化程度过高时,可过渡到半自形到他形,存在过度白云岩化(图5h)。部分白云石表面还可见溶蚀孔缝(图5c)。在与粉晶白云岩相邻层段,细晶白云石粒间也能见到黄铁矿集合体(图5d-g)和草莓状黄铁矿(图5f)。

2.3 中-粗晶白云岩

中-粗晶白云岩(Md3)主要发育在栖霞二段,分布不均匀,厚度变化也较大,在大飞水剖面仅厚3 m,上江沟剖面厚达25 m。当云化作用较强时,中-粗晶白云岩呈条带状分布于细晶白云岩之上,颜色较浅,形似斑状(图3d),内部发育不规则溶蚀孔洞,充填白云石和

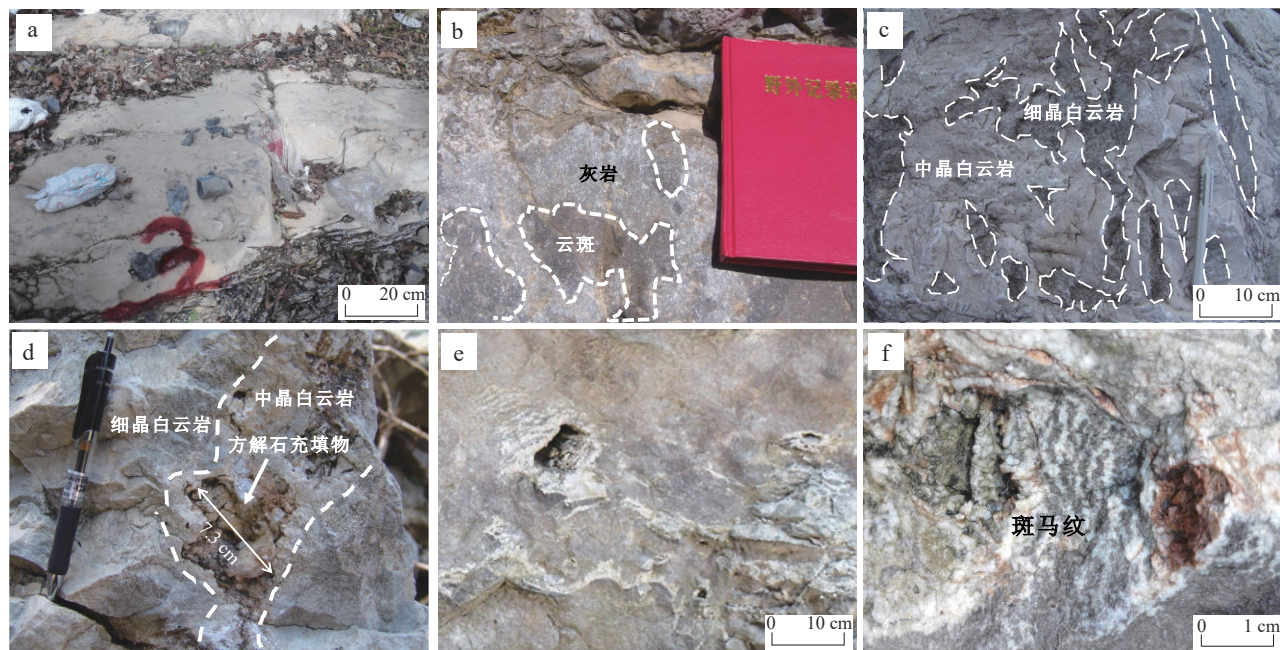


图3 川西地区栖霞组白云岩宏观特征野外照片

Fig. 3 Macro features of dolostone in the Qixia Formation, western Sichuan Basin

a. 层状白云岩, 栖霞一段, 江油-水根头剖面; b. 斑状云质灰岩, 白云岩呈斑状发育于生屑颗粒灰岩上, 栖霞一段, 广元-上江沟剖面; c, d. 细-中晶白云岩, 中晶白云岩比细晶白云岩颜色稍浅, 溶洞非常发育, 充填方解石, 栖霞一段, 广元-上江沟剖面; e, f. 斑马状白云岩, 斑马纹, 溶洞裂缝非常发育, 栖霞二段, 大邑-大飞水剖面

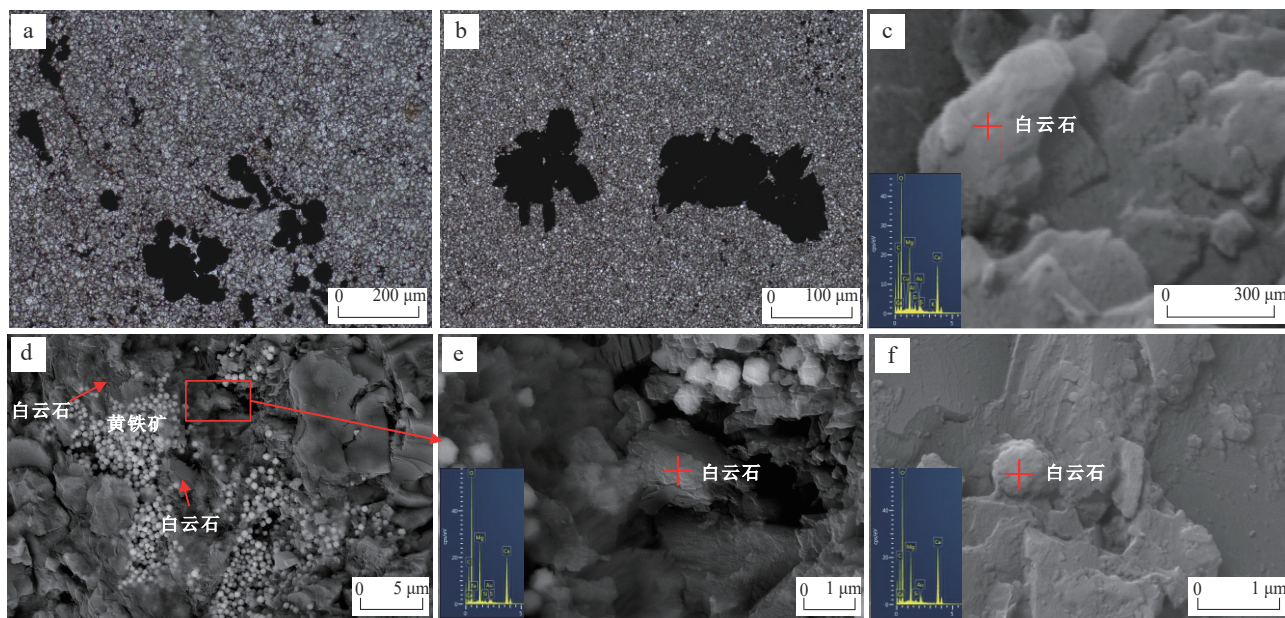


图4 川西地区栖霞组泥-粉晶白云岩岩石学特征显微照片

Fig. 4 Petrological features of micritic-very fine crystalline dolostone in the Qixia Formation, western Sichuan Basin

a, b. 泥晶白云岩, 黄铁矿呈星点状或集合体发育, 单偏光(-), 栖霞一段, 水根头剖面; c. 泥晶白云石呈花椰菜状, SEM, 栖霞一段, 水根头剖面; d. 白云石与黄铁矿颗粒伴生, SEM, 栖霞一段, 水根头剖面; e. 泥晶白云石呈哑铃状, SEM-EDS, 栖霞一段, 水根头剖面; f. 泥晶白云石呈球粒状, SEM-EDS, 栖霞一段, 水根头剖面

方解石(图3d)。野外剖面上也常见斑马状构造, 即深灰色中-粗晶白云岩发育裂缝, 内有白色鞍状白云石

和透明巨晶方解石充填(图3e,f)。

在显微镜下, 中-粗晶白云石晶形主要为非平直

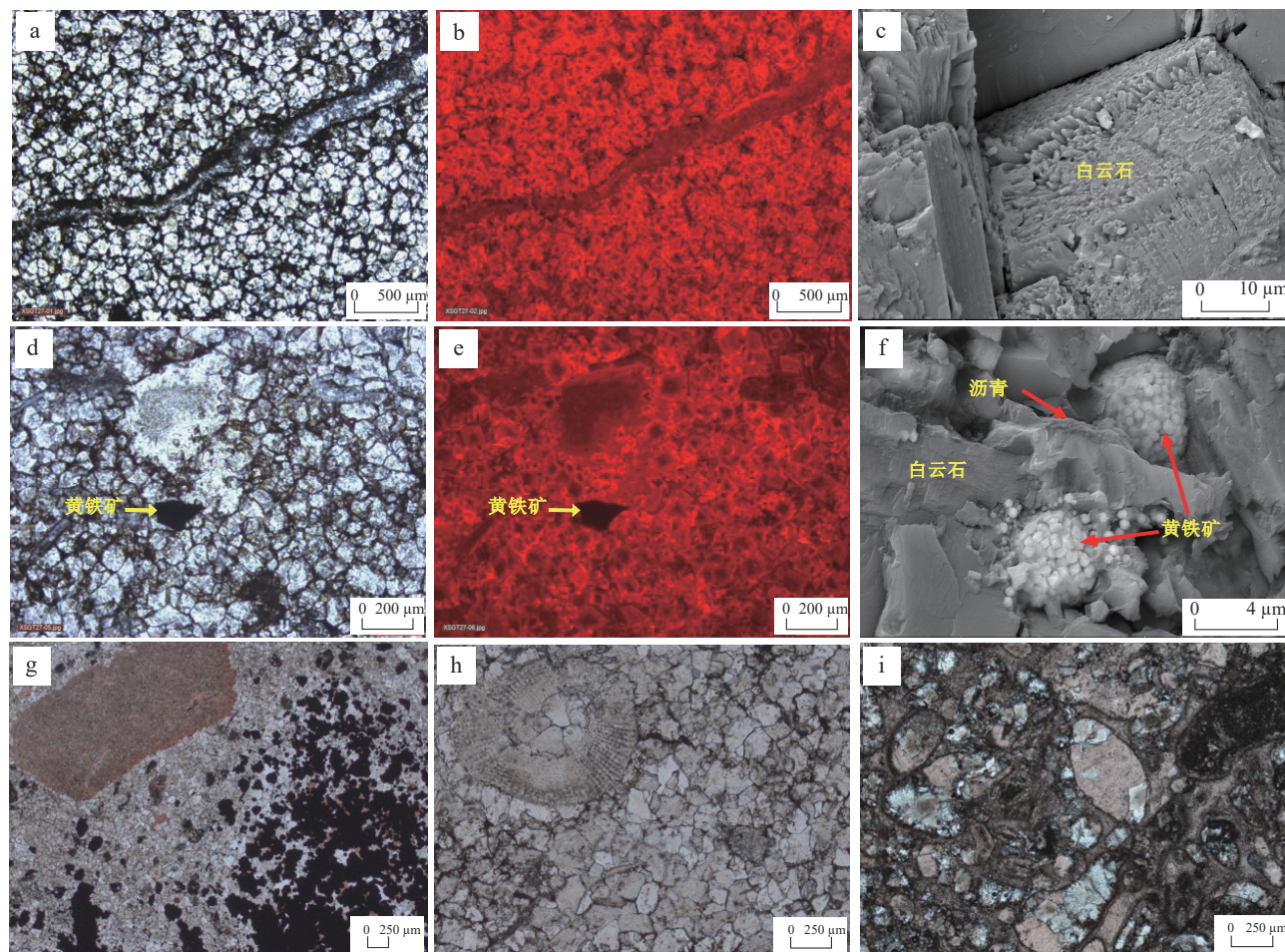


图5 川西地区栖霞组细晶白云岩岩石学特征显微照片

Fig. 5 Petrological features of fine crystalline dolostone in the Qixia Formation, western Sichuan Basin

a. 细晶白云岩,白云石自形程度较好,单偏光(-),栖霞一段,水根头剖面;b. 细晶白云岩,见雾心亮边,阴极发光,栖霞一段,水根头剖面;c. 细晶白云石,晶体表明可见大量溶孔溶缝,单偏光(-),栖霞一段,水根头剖面;d. 白云石粒间发育黄铁矿,SEM,栖霞一段,水根头剖面;e. 白云石粒间发育黄铁矿,阴极发光,栖霞一段,水根头剖面;f. 草莓状黄铁矿充填于白云石粒间,SEM,栖霞一段,水根头剖面;g. 细晶白云岩粒间见大量黄铁矿集合体,单偏光(-),栖霞一段,上江沟剖面;h. 细晶白云岩,白云石呈半自形-他形,单偏光(-),栖霞一段,上江沟剖面;i. 白云质灰岩,生物体腔内发生云化作用,单偏光(-),栖霞二段,双电剖面

晶面他形晶(图6a,b),晶体大小为250~2 000 μm,在阴极发光下,晶体多表现为内部暗、外部亮。部分样品中,晶间孔非常发育(图6d,e)。在扫描电镜下,白云石晶体表面可见大量的溶孔和溶缝(图6c,f)。

2.4 白云石胶结物

白云石胶结物(Cd)主要发育在栖霞二段中-粗晶白云岩(Md3)中,在宏观上表现为乳白色胶结物充填于裂缝或溶蚀孔洞中,与深灰色围岩构成斑马纹状(图3e,f)。白云石胶结物主要为鞍形白云石,晶面弯曲,在阴极发光下可见环带状结构(图7a,b),在正交光下表现出波状消光特征(图7c),扫描电镜下可见白云石晶面明显弯曲(图7e,f)。部分鞍形白云石被后期流体挤压破碎(图7d)。

3 地球化学特征

3.1 碳、氧同位素

在白云岩岩石学分类的基础上,本次研究对不同类型的白云石及其灰质成分进行了碳、氧同位素分析,结果显示不同地层、不同类型的白云石碳、氧同位素差异较大(图8)。

从层位上来看,栖霞一段的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)分布在-3.276‰~4.233‰,栖霞二段的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)与之相近,但范围更大,在-2.800‰~5.637‰;栖霞一段的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)分布在-7.490‰~-0.634‰,栖霞二段的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)更为负偏,分布在-13.300‰~-2.850‰。

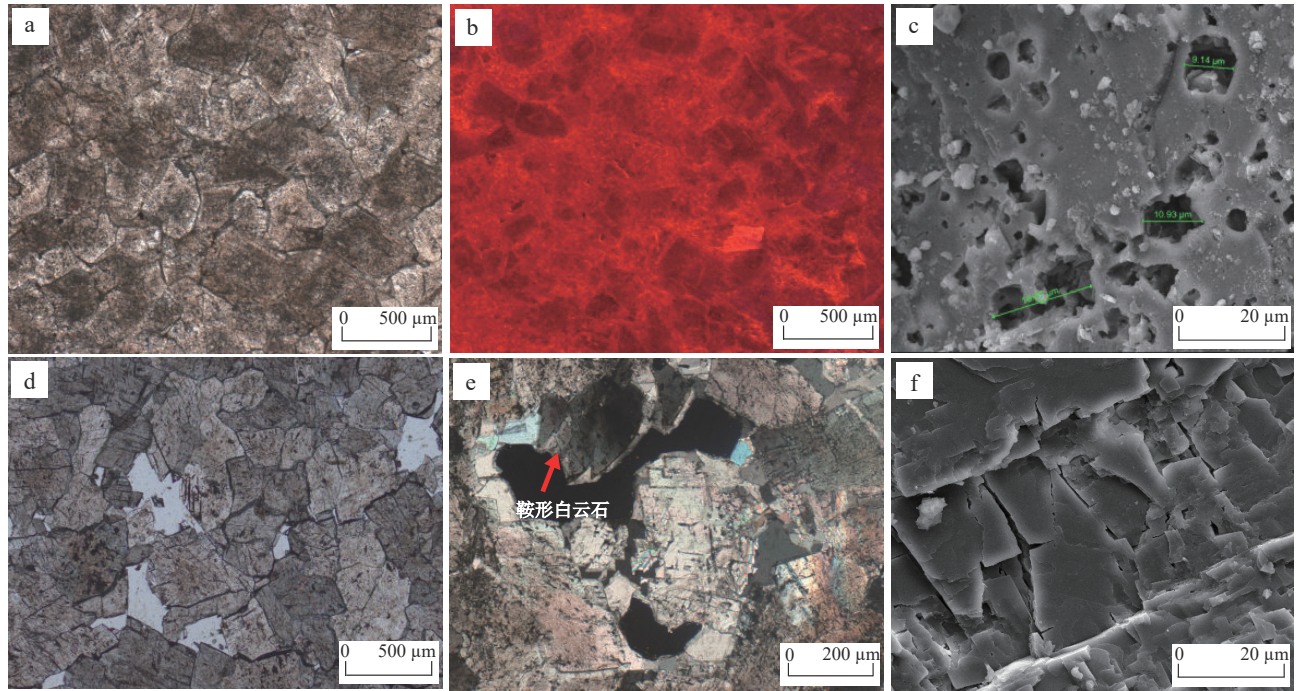


图6 川西地区栖霞组中-粗晶白云石岩石学特征显微照片

Fig. 6 Petrological features of medium to coarse crystalline dolostone in the Qixia Formation, western Sichuan Basin

a. 中-粗晶白云石, 为非平直晶面他形晶, 单偏光(-), 栖霞二段, 上江沟剖面; b. 中-粗晶白云石, 在阴极发光下内部为暗红色, 外部呈亮红色, 阴极发光, 栖霞二段, 上江沟剖面; c. 中-粗晶白云石, 晶体表面见大量溶蚀孔洞, SEM, 栖霞二段, 上江沟剖面; d. 白云石发育晶间溶孔, 单偏光(-), 栖霞二段, 大飞水剖面; e. 粗晶白云石, 晶间孔内充填鞍形白云石, 单偏光(-), 栖霞二段, 大飞水剖面; f. 白云石表面见溶蚀解理缝, SEM, 栖霞二段, 大飞水剖面

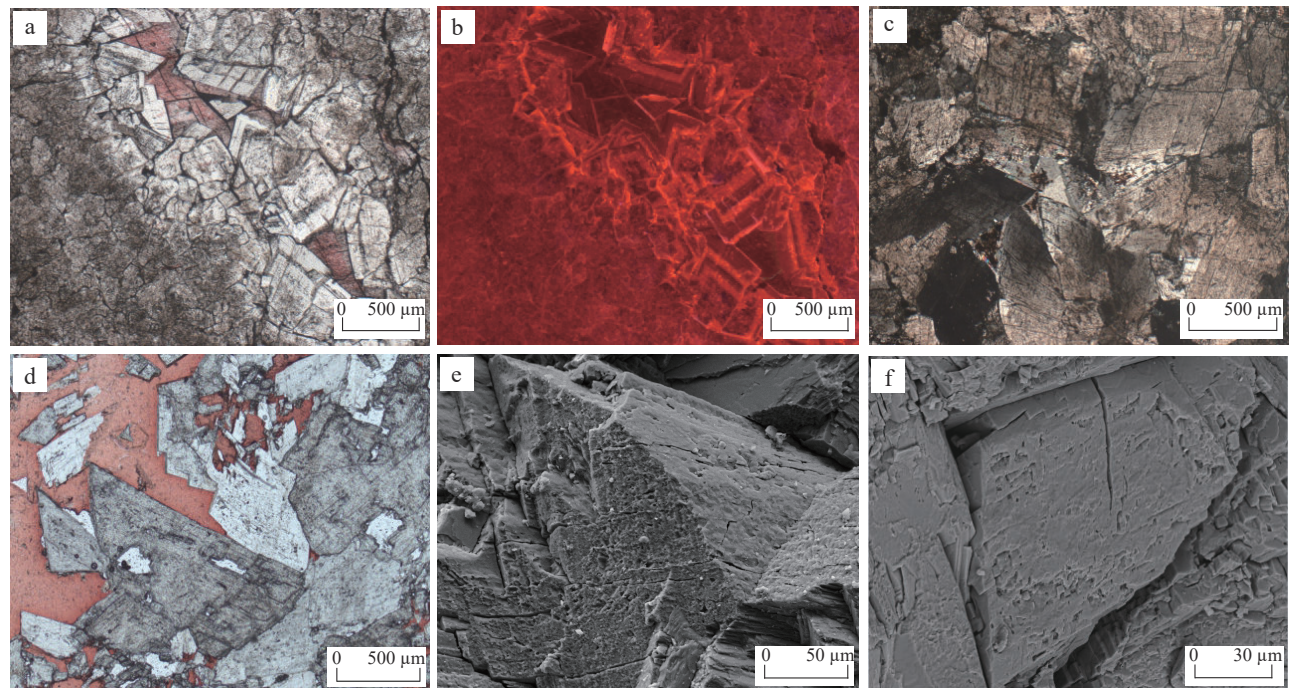


图7 川西地区栖霞组白云石胶结物岩石学特征显微照片

Fig. 7 Petrological features of dolomite cement in the Qixia Formation, western Sichuan Basin

a. 裂缝内发育白云石胶结物, 单偏光(-), 栖霞二段, 上江沟剖面; b. 白云石胶结物发育多期环带结构, 阴极发光, 栖霞二段, 上江沟剖面; c. 鞍形白云石, 晶体波状消光, 正交偏光(+), 栖霞二段, 上江沟剖面; d. 鞍形白云石破碎后被方解石充填, 单偏光(-), 栖霞二段, 上江沟剖面; e, f. 鞍形白云石晶面弯曲, SEM, 栖霞二段, 上江沟剖面

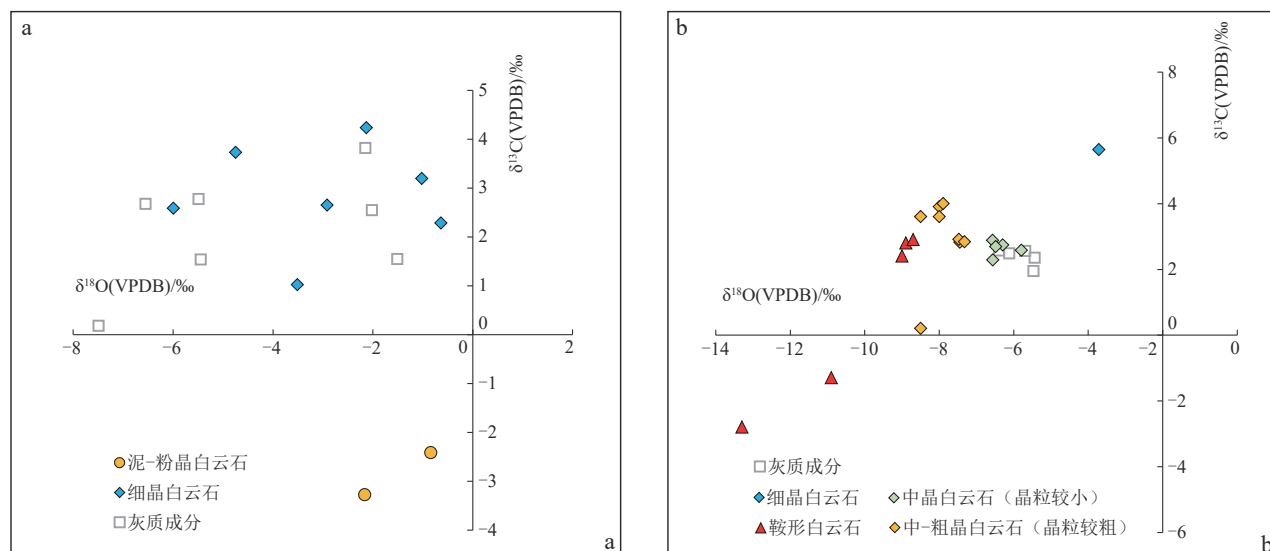


图8 川西地区栖霞一段(a)和栖霞二段(b)碳酸盐岩碳、氧同位素散点图

Fig. 8 Scatter diagrams of carbon and oxygen isotopes in carbonates of the first (a) and second (b) members of Qixia Formation, western Sichuan Basin

从类型上来看,栖霞一段的泥-粉晶白云石 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 为 -3.276‰ 和 -2.416‰ , 栖霞组细晶、中晶、粗晶白云石和基岩灰质成分的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 在 $0.180\text{‰} \sim 5.637\text{‰}$, 均为正值, 基本都处于二叠纪同期海相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 的变化范围内^[21-22]。栖霞二段的鞍形白云石 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 明显负偏。栖霞一段泥-粉晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 为 -2.161‰ 和 -0.835‰ , 处于二叠纪海水数值范围内。栖霞组细晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 在 $-5.988\text{‰} \sim -0.634\text{‰}$, 均高于基岩中的灰质成分, 其范围在 $-7.490\text{‰} \sim -1.506\text{‰}$, 但都处于海水数值范围内。栖霞组细晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 在 $1.021\text{‰} \sim 4.818\text{‰}$, 也高于基岩中灰质成分的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB), 其范围在 $0.180\text{‰} \sim 4.327\text{‰}$, 可能是海水白云岩化过程中氧同位素的分馏所致。栖霞组晶粒较小的中晶白云石 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 在 $-6.574\text{‰} \sim -5.796\text{‰}$, 中-粗晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 在 $-8.500\text{‰} \sim -7.326\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 随白云石晶体不断增大而负偏, 略低于正常海水数值范围, $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 均处于正常海水数值范围内。鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 最为负偏, 其范围在 $-13.300\text{‰} \sim -8.000\text{‰}$, 远低于二叠纪海水数值, $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 波动较大, 在 $-2.800\text{‰} \sim 2.900\text{‰}$ 。

3.2 锶同位素比值

研究区基质灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 含量比值为 0.707601 , 分布于二叠纪海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围内^[21-22] (图9)。细

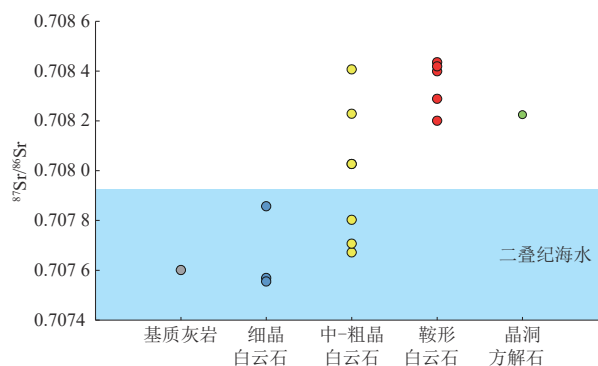


图9 川西地区栖霞组碳酸盐岩锶同位素组成特征

Fig. 9 Sr isotope compositions of carbonates in the Qixia Formation, western Sichuan Basin

晶白云石 Md2 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 $0.707555 \sim 0.707857$, 也处于二叠纪海水数值范围内^[10]。中-粗晶白云石 Md3 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 $0.707672 \sim 0.708407$, 部分高于二叠纪海水数值范围。鞍形白云石 Cd 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 $0.708201 \sim 0.708436$, 均高于二叠纪海水数值范围。

4 成因分析

川西栖霞组白云岩是多期、多种成因类型白云岩叠加过程的产物, 受到沉积环境和峨眉山大火成岩省热事件的共同影响。

4.1 沉积环境

在栖霞组沉积时期, 整个四川盆地都处于热带-

亚热带地区^[23],早期气候温暖潮湿,晚期较为干旱^[24-25],生物繁盛,珊瑚、苔藓虫、海绵、介壳类、蠕虫大量发育。区域内未见膏盐岩等蒸发盐沉积物,因此就整个沉积环境而言,栖霞组不适合生成大规模白云岩。但是川西地区处于整个四川盆地相对较高的位置,局部可能存在适合白云岩化的环境。

在栖霞一段沉积期,水体相对较深,灰泥含量较高。川西地区水体相对较浅,能够形成一些小规模的浅滩,其以亮晶生屑灰岩或生屑颗粒灰岩沉积为主,而在滩间或滩后,可能发育一些小型潟湖,由于受到局限,在海退时其水体盐度可能升高,可能发育泥-粉晶白云岩。

在栖霞二段沉积时期,川西地区地貌相对较高,台地边缘浅滩相更为发育,沉积期水体较浅,在滩间或滩后的小潟湖内,局部水体盐度升高,有利于发生后续的白云岩化作用。

4.2 峨眉山大火成岩省热事件

发生于上扬子地区的中、晚二叠世的峨眉山地裂事件造成了扬子板块西缘地壳快速差异抬升,随后喷发出巨量的玄武岩,形成了出露面积达 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的峨眉山大火成岩省(ELIP),是中国华南地区一次非常重要的地质热事件^[26-27],主体喷发时间约为 $260 \sim 257 \text{ Ma}$ ^[28]。峨眉山大火成岩省引发的拉张伸展作用,影响了中二叠统生屑滩的发育及其平面展布,进而控制了油气储层的发育状况。

除此之外,在峨眉山火成岩大规模爆发之前,峨眉山大火成岩省就已经对四川盆地起到了明显的地热增温效应。朱传庆等^[29]在对四川盆地古热流的恢复中发现,距今 290 Ma 时川西南地区的热流值就出现了异常,超过了 80 mW/m^2 ,越靠近峨眉山喷发区的区域,热流值越高。盆地达到最高古热流的时期(259 Ma)正是中、晚二叠世的分界,也是峨眉山玄武岩的主要喷发期,盆地西南热流值超过了 90 mW/m^2 。这表明在早二叠世栖霞组沉积期,峨眉山大火成岩省岩浆就开始活跃。

温度是突破动力学屏障的重要方式,在常温下很难合成白云石,当达到一定温度时,白云岩化变得相对容易^[30]。因此,峨眉山岩浆活动带来的增温效使栖霞组白云岩化作用的发生有了可能。

4.3 微生物介导白云岩化作用

泥-粉晶白云岩(Md1)可能是微生物介导成因的

白云岩。泥-粉晶白云岩具有较细的晶粒(图4a,b),在扫描电镜下,部分泥晶白云石具有球粒状、哑铃状、花椰菜状结构(图4c,e,f),这正是微生物介导白云石的典型特征^[31-32]。这类白云石还伴生黄铁矿,部分黄铁矿为草莓状(图4d),也有微生物硫酸盐还原菌参与的标志^[33]。在二叠系中,前人还发现了菌类微生物参与建造的微生物灰泥丘^[34]。另外,这类白云石的 $\delta^{18}\text{C}$ 值相较于其他类型白云石明显偏负(图8a),也说明其形成过程有微生物的参与^[33]。

微生物介导白云石在同沉积期就可以形成,Mg离子主要来自海水(图10a)。其形成受到细菌硫酸盐还原作用的影响,微生物代谢活动可以提高细胞外微环境中的pH值和Mg/Ca含量比值,并能加速镁离子的去水合作用,胞外聚合物还能为白云石沉淀提供质点,进而催化白云石在地表温压条件下的沉淀结晶^[32,35,36]。虽然中二叠世时四川盆地基本属于正常海水,但在川西地区相对较浅,发育的滩间和潟湖内水体盐度较高,而这种咸化的海水条件有利于硫酸盐还原菌等微生物活动^[35],为白云石成核提供了极好的介质条件。

在埋藏后,这类白云石不断生长和“成熟”,晶体也逐渐由球粒状、哑铃状、花椰菜状演化成标准菱面体,所以即使是泥-粉晶白云岩中的白云石晶体也多为自形-半自形,在后续的白云岩化过程中起到一个“晶核”的作用^[37]。在与泥-粉晶白云岩相邻层段的细晶白云石粒间也能见到草莓状黄铁矿,说明这些细晶白云石可能也形成于同一环境,也有可能是由泥-粉晶白云石生长演化而来(图5d—g)。

4.4 回流渗透白云岩化作用

川西栖霞组细晶白云岩多为浅埋藏期回流渗透白云岩化作用而成。细晶白云岩晶体较粗,晶形多为自形-半自形(图5a,b),自形程度较高,不同于同生-准同生期白云石。另外,白云岩中不含石膏等蒸发盐矿物,也不同于准同生期萨布哈白云岩化作用。

细晶白云岩发生白云岩化的流体来源主要是海水。白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)和 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)均处于二叠纪正常海水 $\delta^{13}\text{C}$ 范围内(图8a,b),虽然略高于方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)和 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB),但这是白云岩化过程中的同位素分馏导致的,指示白云岩形成于具蒸发背景的局限水体中^[21]。细晶白云石的铍同位素比值也处于二叠纪海水数值范围内(图9),也印证了白云岩化流体是海水。这些同位素特征与前人的研究结果一致,川北野外剖面旺苍双汇、南江桥亭等栖霞组细晶白云

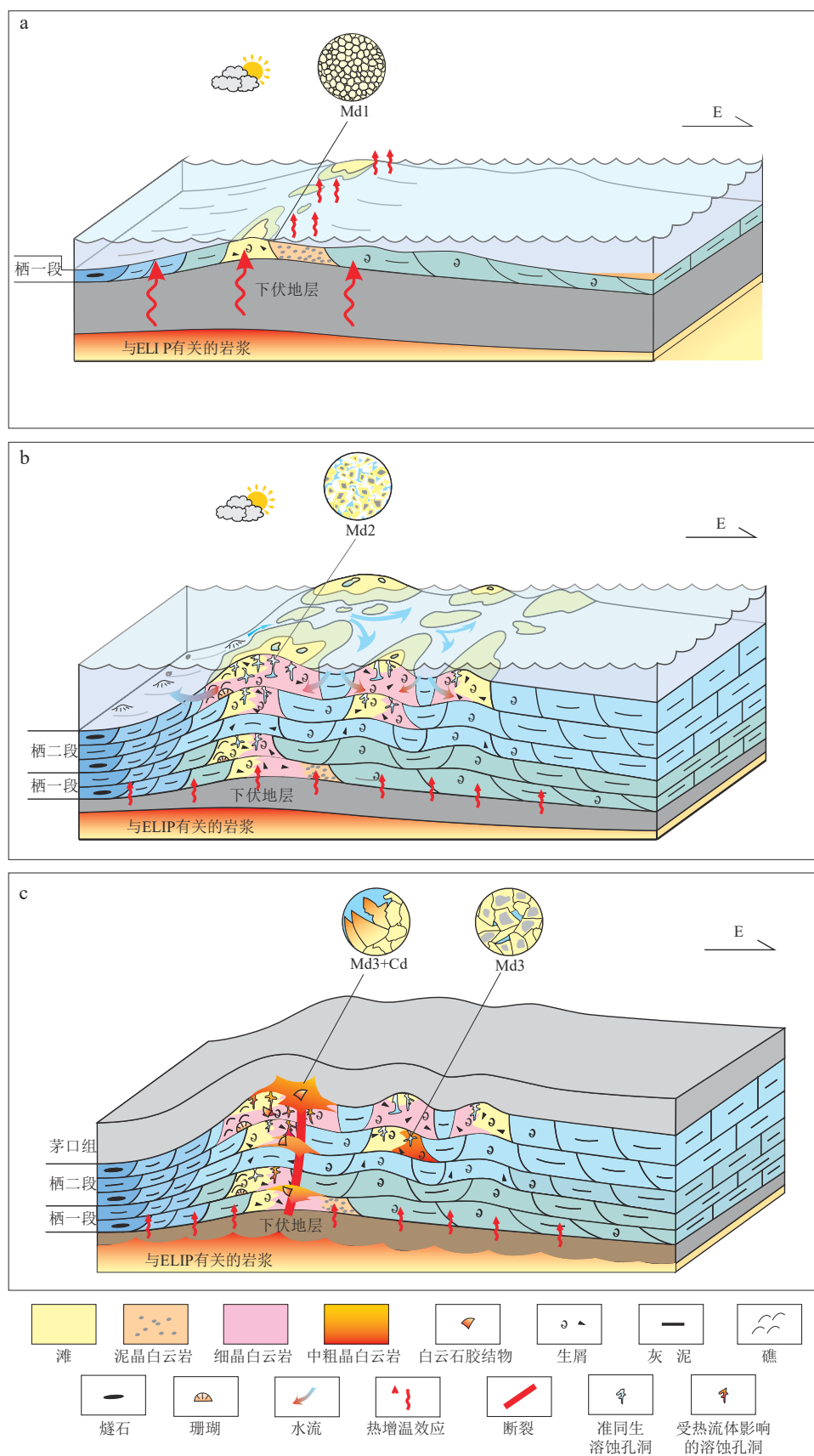


图10 川西地区栖霞组白云岩发育模式

Fig. 10 Genetic models of dolostones in the Qixia Formation, western Sichuan Basin

a. 微生物介导白云岩化; b. 回流渗透白云岩化; c. 热流体调整改造白云岩化

岩的地球化学特征也表明白云石化流体依旧为海水^[38]。

浅埋藏期白云岩化具有选择性,往往优先发育在原始物性较好的岩石上。川西栖霞组发育有台缘浅滩,位于水体较浅的古地貌高地,容易发生准同生期溶蚀,而具有更好的初始物性和渗透性,且栖霞期存在多期短暂海退,出现多次短暂暴露,地层接受多次准同生期溶蚀改造^[18,39]。斑状白云质灰岩中的云斑可能就是在准同生期溶蚀后白云岩化的产物^[40-41]。层状的细晶白云岩中也能见到大量的颗粒,有学者通过恢复后也认为这类岩石主要为浅滩相环境^[9]。

栖霞组沉积期,川西较高古地貌的相对局限环境为浅埋藏期白云岩化提供镁离子源。高频向上变浅丘滩序列建造可引起丘滩叠置迁移,导致滩后局部海域封隔受限,从而具备中等盐度回流渗透白云石化的古环境基础。高频海平面变化与沉积微古地貌高地频繁暴露,极易引起海水不同程度的咸化,而这种密度较大咸化海水会在重力和盐度的驱使下,向下向前期物性相对较好的浅滩相沉积物运移,发生回流渗透白云石化^[43](图10b)。由于水体咸度并未达到石膏沉淀的饱和度,所以亦被称为中等盐度回流渗透白云石化^[43],这与地层中未见石膏相吻合。这种丘滩体叠置迁移也会导致白云岩化发育层位和区域不稳定,白云岩分布情况也印证了这一特征。

中等盐度回流渗透白云岩化模式,是指中等盐度流体在回流渗透的驱动下形成的白云岩。中等盐度流体一般是指盐度高于海水但低于石膏大量沉淀的微咸流体,盐度在37‰~140‰^[44]。此模式也为匈牙利Dachstein台地上三叠统白云岩^[45]、地中海西部Peritidal地区下侏罗统白云岩^[46]及四川盆地中部地区下寒武统龙王庙组白云岩所证实^[47]。

4.5 热流体调整改造作用

中-粗晶白云岩是受到峨眉山大火成岩省影响的热流体调整形成的(图10c)。中-粗晶白云岩形成于更高的温度。中粗晶-白云石相较于其他类型白云岩,晶体更大也更不规则, $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)均低于正常海水数值范围(图8b),说明其受到了后期流体的改造^[49],同时伴生的鞍形白云石具有弯曲的晶面、波状消光(图6e),指示较高的形成温度^[49],这与中二叠世末的峨眉山大火成岩活动达到顶峰,古地温流体温度达到较高值有关。

在中-粗晶白云石中,尤其是在阴极发光下,仍可

见具有平直晶面细晶白云石的残余结构(图6a,b),这说明其可能来源于细晶白云岩重结晶或热调整。

相关的热调整机制可能存在两种模式:一种是受到来自或穿碎屑岩层热流体的直接影响;一种仅为热增温调整。二者对基质白云岩的影响存在明显差异。前者的产物中-粗晶白云岩常发育斑马纹,溶蚀缝也较为发育(图3e,f),溶蚀孔隙内充填鞍状白云石,而白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高(图9),也显示受到了来自或穿碎屑岩层热流体的影响,因为地质体中碎屑岩层具有比海相层系和岩浆岩更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,鞍状白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均高于同期海水数值说明其沉淀于来自或穿碎屑岩层的热流体。而后的产物中-粗晶白云岩中斑马纹常不发育,鞍状白云石也较少见, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值部分处于海水数值范围内(图9),说明热改造流体仍属于海水。

在峨眉山大火成岩省的活跃期,在断裂发育区,来自或穿碎屑岩层的热流体经断裂向上运移,进入物性较好的细晶白云岩发育区,引发水压破裂造缝、重结晶和热调整作用,并在孔隙内沉淀鞍状白云石,地化数据上表现为低 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)和 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)(图8),高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(图9)。在断裂相对不发育区,同样受热增温效应影响而发生的热调整和重结晶作用使晶体变粗,但由于缺乏外来流体的影响,地化特征上仅表现为低氧、碳同位素值和与海水相近锶同位素比值。

5 结论

1) 川西地区栖霞组白云岩多呈斑状或层状分布。白云石类型包括泥-粉晶白云石、细晶白云石、中-粗晶白云石和白云石胶结物,是多期、多类型白云岩化流体叠加作用的产物。受同生-准同生期微生物介导白云岩化作用、浅埋藏期回流渗透白云岩化作用和埋藏期热液白云岩化作用的影响,早期的两种白云岩化作用奠定了白云岩发育的基础,后期热液作用又对局部地区进行了改造。

2) 泥-粉晶白云岩(Md1)主要发育于栖霞组底部,多呈层状或纹层状,也见斑状发育,主要为半自形晶-他形晶,常与草莓状黄铁矿伴生,部分泥晶白云石呈球粒状、哑铃状和花椰菜状,表明泥-粉晶白云石可能为微生物介导作用而生成。细晶白云岩(Md2)在栖霞一段和栖霞二段都有发育,一般为斑状或层状,主要为自形-半自形晶,多具有雾心亮边结构,在阴极发光下晶体内部呈棕色-暗红色,由内向外先变亮、后变暗。白

云岩具有明显的残余粒屑结构,表明前驱岩性为颗粒灰岩,可能是浅埋藏期中等盐度回流渗透白云岩化作用的产物。中-粗晶白云岩主要发育在栖霞二段,呈斑状或层状,主要为非平直晶面他形晶,阴极发光下多表现为内部暗、外部亮的特征。中-粗晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值仍处于海水数值范围内,未见鞍形白云石,可能是细晶白云岩重结晶或热调整的产物。当与鞍形白云石等热液矿物伴生时说明受到了来自或穿碎屑岩层热流体的直接影响。

3) 浅埋藏期的回流渗透白云岩化作用对于栖霞组白云岩储层的形成十分关键,同生期微生物介导白云岩化作用为后续的白云岩化过程提供了晶核,后期的热流体对局部地区的栖霞组碳酸盐岩进行了调整和改造。

致谢:感谢核工业北京地质研究院于阿朋老师协助完成扫描电镜观察工作,感谢朱东亚教授和钱一雄教授对本文提出的修改意见!

参 考 文 献

- [1] DE DOLOMIEU D G. Sur un genre de pierres calcaires très peu effervescentes avec les acides et phosphorescentes par la collision [J]. *Journal de Physique*, 1791, 39(1): 3-10.
- [2] WARREN J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [3] 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.
- [4] BADIOZAMANI K. The dorag dolomitization model, application to the middle Ordovician of Wisconsin [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1973, 43(4): 965-984.
- [5] DEFFEYES K S, LUCIA F J, WEYL P K. Dolomitization of recent and plio-pleistocene sediments by marine evaporite waters on Bonaire, Netherlands Antilles [M]//PRAY L C, MURRAY R C, ed. *Dolomitization and Limestone Diagenesis*. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1965: 71-88.
- [6] MCKENZIE J A. Holocene dolomitization of calcium carbonate sediments from the coastal sabkhas of Abu Dhabi, U. A. E.: A stable isotope study [J]. *The Journal of Geology*, 1981, 89(2): 185-198.
- [7] DAVIES G R, SMITH L B, Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [8] 何治亮, 马永生, 张军涛, 等. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 1-14.
- HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHANG Juntao, et al. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 1-14.
- [9] 张本健, 尹宏, 李荣容, 等. 四川盆地西南部平探1井中二叠统栖霞组天然气勘探新突破及其意义 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(7): 34-41.
- ZHANG Benjian, YIN Hong, LI Rongrong, et al. New breakthrough of natural gas exploration in the Qixia Formation of Middle Permian by Well Pingtan 1 in the southwestern Sichuan Basin and its implications [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(7): 34-41.
- [10] 李荣容, 杨迅, 张亚, 等. 川西北地区双鱼石区块二叠系栖霞组气藏储层特征及高产模式 [J]. *天然气勘探与开发*, 2019, 42(4): 19-27.
- LI Rongrong, YANG Xun, ZHANG Ya, et al. Characteristics and high-yield model of gas reservoirs of Permian Qixia Formation, Shuangyushi area, northwestern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2019, 42(4): 19-27.
- [11] 金振奎, 金明, 贾若溪. 科研论文写作方法与技巧 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2018: 150.
- JIN Zhenkui, JIN Ming, JIA Ruoxi. Writing methods and skills for research papers [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 150.
- [12] 黄思静, 李小宁, 黄可可, 等. 四川盆地西部栖霞组热液白云岩中的自生非碳酸盐矿物 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(4): 343-352.
- HUANG Sijing, LI Xiaoning, HUANG Keke, et al. Authigenic noncarbonate minerals in hydrothermal dolomite of Middle Permian Qixia Formation in the west of Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39(4): 343-352.
- [13] 杨雨然, 张亚, 谢忱, 等. 川西北地区中二叠统栖霞组热液作用及其对储层的影响 [J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(6): 44-53.
- YANG Yuran, ZHANG Ya, XIE Chen, et al. Hydrothermal action of Middle Permian Qixia Formation in northwestern Sichuan Basin and its effect on reservoirs [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(6): 44-53.
- [14] 韩月卿, 张军涛, 黄振凯, 等. 热液白云岩定年方法研究——以四川盆地二叠系热液白云岩为例 [J]. *地球科学前沿*, 2022, 12(5): 627-635.
- HAN Yueqing, ZHANG Juntao, HUANG Zhenkai, et al. Study on dating method of hydrothermal dolomite—a case study of hydrothermal dolomite of Permian Formation in Sichuan Basin [J]. *Advances in Geosciences*, 2022, 12(5): 627-635.
- [15] 何溥为, 胥旺, 张连进, 等. 川中磨溪-高石梯地区栖霞组白云岩特征及成因机制 [J]. *沉积学报*, 2021, 39(6): 1532-1545.
- HE Puwei, XU Wang, ZHANG Lianjin, et al. Characteristics and genetic mechanism of Qixia Formation dolomite in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(6): 1532-1545.

- [16] 金振奎, 冯增昭. 滇东-川西下二叠统白云岩的形成机理——玄武岩淋滤白云化[J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 383-389.
JIN Zhenkui, FENG Zengzhao. Origin of dolostones of the Lower Permian in East Yunnan—West Sichuan—dolomitization through leaching of basalts [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3): 383-389.
- [17] 李明隆, 谭秀成, 罗冰, 等. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组相控早期高频暴露岩溶特征及启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 66-82.
LI Minglong, TAN Xiucheng, LUO Bing, et al. Characteristics of facies-controlled and early high-frequency exposed karstification in the Qixia Formation of Middle Permian in the northwest of Sichuan Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 66-82.
- [18] 芦飞凡, 谭秀成, 钟原, 等. 四川盆地西北部二叠系栖霞组同生期砂糖状白云岩特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1134-1148, 1173.
LU Feifan, TAN Xiucheng, ZHONG Yuan, et al. Origin of the penecontemporaneous sucrosic dolomite in the Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1134-1148, 1173.
- [19] 韩月卿, 韩文彪, 金振奎. 川西中二叠统栖霞组岩石学特征及沉积相研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(5): 563-572.
HAN Yueqing, HAN Wenbiao, JIN Zhenkui. Lithological characteristics and sedimentary facies of Middle Permian Qixia Formation in western Sichuan Basin [J]. Advances in Geosciences, 2022, 12(5): 563-572.
- [20] 韩月卿, 李双建, 韩文彪, 等. 川东南地区中二叠统茅口组灰泥灰岩储层孔隙特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 666-676.
HAN Yueqing, LI Shuangjian, HAN Wenbiao, et al. Pore characteristics of marl reservoir in Maokou Formation of Middle Permian, southeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(4): 666-676.
- [21] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. Chemical Geology, 1999, 161(1/3): 59-88.
- [22] ALLAN J R, WIGGINS W D. Dolomite reservoirs: Geochemical techniques for evaluating origin and distribution [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993: 129.
- [23] REES P M, ZIEGLER A M, GIBBS M T, et al. Permian phytogeographic patterns and climate data/model comparisons [J]. The Journal of Geology, 2002, 110(1): 1-31.
- [24] 颜佳新. 华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 579-587.
YAN Jiaxin. Origin of Permian Chihshian carbonates from South China and its geological implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 579-587.
- [25] GIBBS M T, REES P M, KUTZBACH J E, et al. Simulations of Permian climate and comparisons with climate-sensitive sediments [J]. The Journal of Geology, 2002, 110(1): 33-55.
- [26] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义[J]. 地质论评, 2006, 52(1): 30-37.
HE Bin, XU Yigang, XIAO Long, et al. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications [J]. Geological Review, 2006, 52(1): 30-37.
- [27] 杨鹏成, 杨光, 陈新伟, 等. 峨眉山大火成岩省对四川盆地油气储层的控制作用研究[J]. 地质科学, 2022, 57(1): 100-114.
YANG Pengcheng, YANG Guang, CHEN Xinwei, et al. The control of Emeishan Large Igneous Province on oil and gas reservoir in the Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(1): 100-114.
- [28] 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 等. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(1): 25-39.
XU Yigang, HE Bin, LUO Zhenyu, et al. Study on mantle plume and large igneous provinces in China: An overview and perspectives [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(1): 25-39.
- [29] 朱传庆, 徐明, 袁玉松, 等. 峨眉山玄武岩喷发在四川盆地的地热学响应[J]. 科学通报, 2010, 55(6): 474-482.
ZHU Chuanqing, XU Ming, YUAN Yusong, et al. Palaeo-geothermal response and record of the effusing of Emeishan basalts in Sichuan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(6): 474-482.
- [30] GREGG J M, BISH D L, KACZMAREK S E, et al. Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: A review [J]. Sedimentology, 2015, 62(6): 1749-1769.
- [31] MCKENZIE J A, VASCONCELOS C R. Dolomite mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: Historical developments and new perspectives [J]. Sedimentology, 2009, 56(1): 205-219.
- [32] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉. 塔里木盆地中上寒武统叠层石白云岩中微生物矿化组构特征及其成因意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1777-1790.
YOU Xuelian, SUN Shu, ZHU Jingquan. Significance of fossilized microbes from the Cambrian stromatolites in the Tarim Basin, northwest China [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(8): 1777-1790.
- [33] 胡文瑄, 朱井泉, 王小林, 等. 塔里木盆地柯坪地区寒武系微生物白云岩特征、成因及意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 860-869.
HU Wenxuan, ZHU Jingquan, WANG Xiaolin, et al. Characteristics, origin and geological implications of the Cambrian microbial dolomite in Keping area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 860-869.
- [34] 刘治成, 杨巍, 王炜, 等. 四川盆地中二叠世栖霞期微生物丘及其对沉积环境的启示[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 1009-1023.

- LIU Zhicheng, YANG Wei, WANG Wei, et al. The microbial mud mound of the Middle Permian Qixia period in Sichuan Basin and its indication significance to sedimentary environment [J]. *Geology in China*, 2015, 42(4): 1009–1023.
- [35] PETRASH D A, BIALIK O M, BONTIGNALI T R R, et al. Microbially catalyzed dolomite formation: From near-surface to burial[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 558–582.
- [36] VAN LITH Y, WARTHMANN R, VASCONCELOS C, et al. Sulphate-reducing bacteria induce low-temperature Ca-dolomite and high Mg-calcite formation [J]. *Geobiology*, 2003, 1(1): 71–79.
- [37] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1–288.
- HUANG Sijing. Carbonate diagenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 1–288.
- [38] 李小宁, 黄思静, 黄可可, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组白云石化海相流体的地球化学依据[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 35–45.
- LI Xiaoning, HUANG Sijing, HUANG Keke, et al. Geochemical characteristics of Middle Permian Qixia Fm dolomitized marine fluids in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 35–45.
- [39] 胡笙, 谭秀成, 罗冰, 等. 四川盆地西北部二叠系栖霞阶序地层特征及地质意义[J]. *古地理学报*, 2020, 22(6): 1109–1126.
- HU Sheng, TAN Xiucheng, LUO Bing, et al. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of the Permian Qixia stage in northwestern Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(6): 1109–1126.
- [40] 陈战杰, 张镔. 关于“豹皮灰岩”的成因[J]. *矿物岩石*, 1991, 11(2): 41–46.
- CHEN Zhanjie, ZHANG Bin. On the origin of the Baopi limestone [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1991, 11(2): 41–46.
- [41] 韩波, 冯菊芳, 何治亮, 等. 四川盆地寒武统豹斑灰岩成因机理及其对储层的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 764–775, 783.
- HAN Bo, FENG Jufang, HE Zhiliang, et al. Origin of the Lower Cambrian leopard-pattern limestones and its influence on reservoirs in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 764–775, 783.
- [42] 李明隆, 谭秀成, 苏成鹏, 等. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组砂糖状白云岩特征及成因机制——以广元上寺剖面为例[J]. *地质论评*, 2020, 66(3): 591–610.
- LI Minglong, TAN Xiucheng, SU Chengpeng, et al. Characteristics and genesis of sucrosic dolomite in Middle Permian Chihhsia Formation, northwest Sichuan Basin: A case study from Shangsi section [J]. *Geological Review*, 2020, 66(3): 591–610.
- [43] QING Hairuo, MOUNTJOY E W. Formation of coarsely crystalline, hydrothermal dolomite reservoirs in the Presqu'ile barrier, western Canada sedimentary basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(1): 55–77.
- [44] 袁鑫鹏, 刘建波. 回流渗透模式白云岩研究历史与进展[J]. *古地理学报*, 2012, 14(2): 219–228.
- YUAN Xinpeng, LIU Jianbo. Research history and progress on reflux seepage dolostone [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(2): 219–228.
- [45] HAAS J, DEMÉNY A. Early dolomitisation of Late Triassic platform carbonates in the Transdanubian Range (Hungary) [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 151(3/4): 225–242.
- [46] QING Hairuo, BOSENCE D W J, ROSE E P F. Dolomitization by penesaline sea water in Early Jurassic peritidal platform carbonates, Gibraltar, western Mediterranean [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(1): 153–163.
- [47] YANG Xuefei, TANG Hao, WANG Xingzhi, et al. Dolomitization by penesaline sea water in Early Cambrian Longwangmiao Formation, central Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(2): 305–314.
- [48] 郑浩夫, 袁璐璐, 刘波, 等. 川西南中二叠统中粗晶白云石流体来源分析[J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 589–597.
- ZHENG Haofu, YUAN Lulu, LIU Bo, et al. Origins of dolomitization fluids within Middle Permian coarse dolomite, SW Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 589–597.
- [49] 黄思静, 兰叶芳, 黄可可, 等. 四川盆地西部中二叠统栖霞组晶洞充填物特征与热液活动记录[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 687–698.
- HUANG Sijing, LAN Yefang, HUANG Keke, et al. Vug fillings and records of hydrothermal activity in the Middle Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 687–698.

(编辑 卢雪梅)