

四川盆地中二叠统热液白云岩化作用及其储层改造意义

李双建^{1,2}, 杨天博³, 韩月卿^{1,2}, 高平³, 沃玉进¹, 何治亮^{2,4}

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院 构造与沉积储层实验室, 北京 100083;
3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 4. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728]

摘要:四川盆地中二叠统热液白云岩类型多、分布广,对油气勘探具有重要意义,但是关于热液白云岩化作用的机理和模式及其对储层的改造意义存在较多争议。在系统收集前期研究资料的基础上,通过对典型地区热液白云岩的矿物学、岩相学和地球化学等详细分析,总结了热液白云岩化作用的机理及其储层改造意义。研究认为:四川盆地中二叠统热液白云岩化作用与围岩的岩性和岩相没有明显的相关性,主要与同期断裂活动有关。根据热液白云岩与围岩的关系,可以将热液白云岩化模式分为3类:①滩相改造型热液白云岩化,主要分布在川西和川中地区的栖霞组中,热液白云岩化作用对储层的建设性改造作用不明显;②岩溶灰岩改造型热液白云岩化,主要分布在川中地区的茅口组中,热液白云岩化作用对该类储层的建设性改造作用也不明显;③致密灰岩改造型热液白云岩化,主要发育在川东地区的茅口组中,热液白云岩化作用对该类储层的建设性改造作用比较明显。断裂裂缝、充填残余的溶蚀孔和白云石晶间孔是热液改造型储层的主要储集空间,相比于原岩物性较好的储层,原始储集物性较差的储层受热液及其相关构造作用改造后,物性改善更加明显。

关键词:热液白云岩;储层;栖霞组;茅口组;中二叠统;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Hydrothermal dolomitization and its role in improving Middle Permian reservoirs for hydrocarbon accumulation, Sichuan Basin

Li Shuangjian^{1,2}, Yang Tianbo³, Han Yueqing^{1,2}, Gao Ping³, Wo Yujin¹, He Zhiliang^{2,4}

[1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Structural Geology and Reservoir Laboratory, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

4. SINOPEC, Beijing 100728, China]

Abstract: The Middle Permian in the Sichuan Basin hosts various types of hydrothermal dolomites that are important to oil and gas exploration. Their mechanisms and occurring models as well as their contribution to reservoir quality enhancement have been the focus of study for years but a consensus is yet to be reached. This paper summarizes the mechanisms and their role in shaping reservoirs through detailed mineralogical, petrographic and geochemical analyses of hydrothermal dolomites from typical locations in the Sichuan Basin. The results show that the hydrothermal dolomitization in the Middle Permian of the Sichuan Basin is mainly related to contemporaneous fault activities and has no obvious correlation with the lithology and lithofacies of surrounding rocks. According to the relationship between hydrothermal dolomites and surrounding rocks, the hydrothermal dolomitization possibly occurs in three models: (1) hydrothermal dolomitization from modification of grain-beach facies, mainly occurring in the Qixia Formation of western and central Sichuan Basin and has no significant contribution to the improvement of reservoirs; (2) hydrothermal dolomitization from modification of karstified limestone, mainly occurring in the Maokou Formation of central Sichuan Basin and is insignificant in contributing to reservoir quality enhancement; and (3) hydrothermal dolomitization from modification of tight limestone, mainly occurring in the Maokou Formation of eastern Sichuan Basin and has contributed

收稿日期:2020-07-28;修订日期:2021-10-06。

第一作者简介:李双建(1978—),男,研究员,构造地质与盆地分析。E-mail:lishuangjian_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金重点基金项目(91755211, U19B6003);国家科技重大专项(2017ZX05005-001)。

greatly to reservoir property improvement. Fault-related fractures, residual dissolution pores and dolomite intercrystalline pores constitute most storage space in reservoirs with hydrothermal dolomitization. Compared with reservoirs with relatively good initial physical properties, the reservoirs with poor initial physical properties are even more significant in terms of quality enhancement after hydrothermal dolomitization and relevant structural activities.

Key words: hydrothermal dolomite, reservoir, Qixia Formation, Maokou Formation, Middle Permian, Sichuan Basin

热液白云岩主体由热液白云石组成,热液白云石形成于比围岩温度高(至少高 5°C)的热流体交代或沉淀^[1]。世界范围内,在许多盆地中都发现了以热液白云岩储层为主要储层的油气田,如加拿大的西加盆地、美国的密歇根和阿巴拉契亚盆地、中东的波斯湾盆地等^[2]。国内四川盆地、塔里木盆地的元古界-古生界碳酸盐岩中也见到有明显热液白云岩化改造现象^[3-9]。近年来四川盆地油气勘探过程中,川西南周公山、川西北矿山梁-双鱼石、川中南充-阆中、川东卧龙河-涪陵地区的汉深1井、周公1井、矿3井、双探3井、南充1井、广探2井、卧117井和泰来6井等均在的中二叠统中钻遇了热液白云岩储层(图1a),储层最厚可达112 m,单井测试产量最高为 $251\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。当前对四川盆地中二叠统白云岩的发育模式与主控因素存在多种认识,如李毅等^[10]和汪华等^[11]以热水沉积理论提出的热次盆概念为基础,认为是基底断裂附近的异常高温促使基岩发生白云岩化;黄思静等^[12]和李小宁等^[13]认为

该时期的白云岩受到了峨眉山大火成岩省的热事件影响,异常高温使基岩发生白云岩化,白云岩化流体的来源为海源流体;陈轩等^[14]、刘宏等^[15]和刘建强等^[16]认为残余海水和岩浆热液共同为该地层提供白云岩化流体,峨嵋地裂运动为白云岩化流体提供了运移的快速通道;孟森等^[17]和Zheng等^[18]认为白云岩主要形成于滩相暴露状态下,发生海水白云岩化作用,局部受到热液改造作用。总之,四川盆地中二叠统热液白云岩分布广,但是由于原岩岩相和岩性的差异以及断裂发育程度的不同,热液白云岩化程度也有较大差异,造成在热液白云岩的成因模式和分布规律的认识上存在较大争议。本文在充分搜集整理前人研究资料的基础上,补充了重点剖面 and 钻井的实测数据,分析了不同层系和岩相区热液白云岩的岩石学和地球化学特征,依据原岩岩性、白云岩化流体来源和断裂切割关系,建立了热液白云岩化模式,并探讨了不同类型的白云岩化模式对储层发育的影响,以期能对储层分布预测和油气

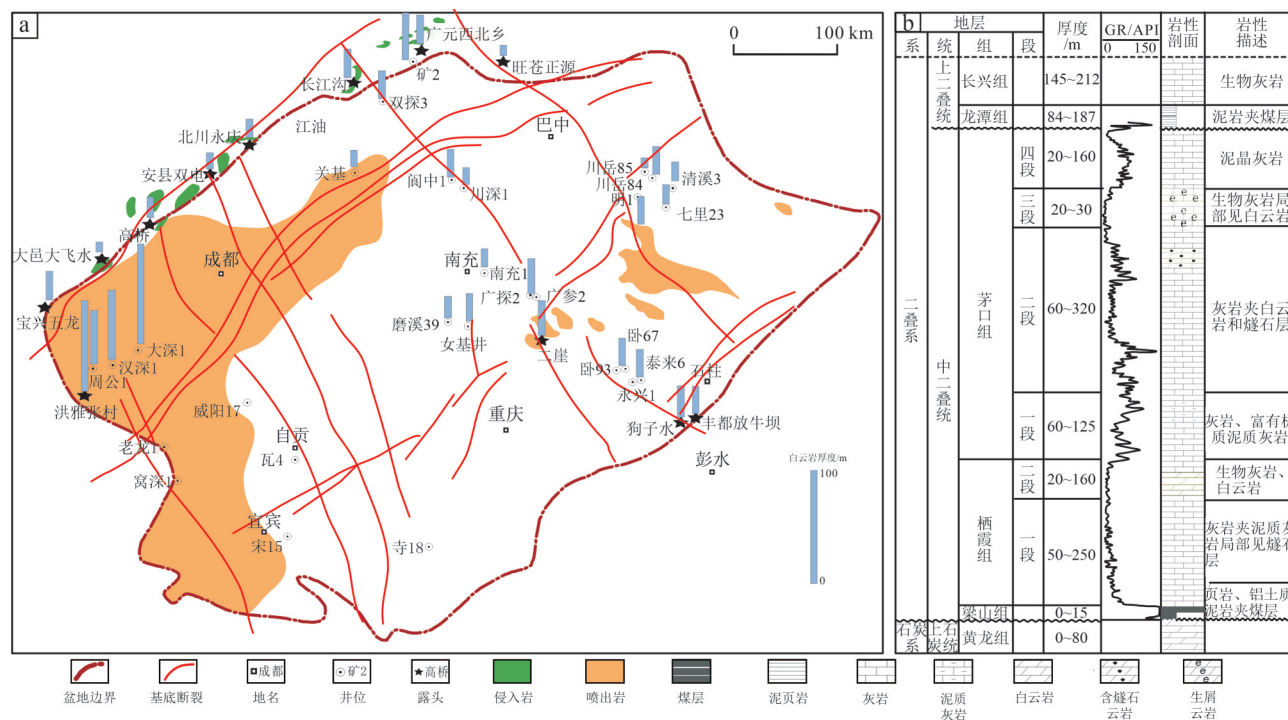


图1 四川盆地中二叠统白云岩分布(a)与二叠系岩性柱状图(b)

Fig. 1 Distribution of the Middle Permian dolomites (a) and lithologic column of the Middle Permian (b), Sichuan Basin

勘探起到借鉴作用。

1 地质背景

四川盆地中二叠统包括栖霞组(P_2q)和茅口组(P_2m),下伏地层为中二叠统梁山组(P_2l)滨岸沼泽相含煤碎屑岩,顶部与上二叠统龙潭组(P_3l)含煤碎屑岩或吴家坪组(P_3w)硅质页岩呈不整合接触。栖霞组分为2个岩性段,栖霞一段(P_2q^1)主要为深灰色薄层泥质灰岩与中薄层生屑泥晶灰岩,栖霞二段(P_2q^2)为灰色中厚层生屑灰岩,局部地区见白云岩化。栖霞组厚度介于30~310 m,平均厚度约125 m。茅口组分为四段,茅一段(P_2m^1)主要发育灰色、深灰色生物碎屑灰岩夹泥质灰岩,富含有机质;茅二段(P_2m^2)发育浅灰色、灰白色生物碎屑灰岩,夹灰褐色厚层状泥质灰岩,局部地区有机质丰富;茅三段(P_2m^3)以浅灰色、灰白色云质灰岩

为主;茅四段(P_2m^4)部分地区因剥蚀而保存不全,主要发育灰色生物碎屑灰岩,川西北部分地区发育硅质页岩。茅口组总体厚度介于190~250 m(图1b)。

中二叠统白云岩储层主要发育在栖霞二段和茅二段、茅三段,岩性是晶粒白云岩和斑状灰质白云岩,晶粒白云岩包括中-细晶白云岩和残余颗粒中-细晶白云岩,有效储层主要分布在晶粒白云岩中。

通过钻井和露头厚度的统计,四川盆地中二叠统热液白云岩主要分布在川西南峨眉山—雅安—宝兴—大邑一带、川西北通口—剑阁—广元—旺苍一带以及川中华蓥山地区,白云岩横向上分布非常不稳定(图1a),很难在较大范围内进行追踪对比,各个地区白云岩厚度差异较大,川西南地区汉1井白云岩厚度最大,为112 m,川西北地区旺苍王家沟剖面白云岩厚度最薄,仅为1.7 m(表1)。如此大的厚度变化说明了四川盆地中二叠统白云岩的分布具有非常强的非均质性。

表1 四川盆地中二叠统白云岩厚度统计

Table 1 Thickness of the Middle Permian dolomites, Sichuan Basin

剖面或钻井	白云岩厚度/m	成因	资料来源	剖面或钻井	白云岩厚度/m	成因	资料来源
女基	25.0	热液	陈轩等,2012 ^[14]	卧67	23.0	—	韩晓涛等,2016 ^[22]
汉深1	62.0	热液	陈轩等,2013 ^[19]	广探2	31.0	热液	刘宏等,2016 ^[15]
大邑大飞水	5.0	热液	张文等,2014 ^[20]	周公1	50.5	热液	胡安平等,2018 ^[23]
宝兴西大河	70.0	热液	张文等,2014 ^[20]	江油五花洞	23.0	—	胡安平等,2018 ^[23]
华蓥山二崖	28.0	—	张文等,2014 ^[20]	广参2	25.0	热液	胡安平等,2018 ^[23]
华蓥山西天	10.0	—	张文等,2014 ^[20]	双探3	23.0	—	胡安平等,2018 ^[23]
新开寺	37.0	热液	张文等,2014 ^[20]	大深1	96.4	热液	胡安平等,2018 ^[23]
汉6	78.0	—	张文等,2014 ^[20]	汉1	112.0	热液	胡安平等,2018 ^[23]
油1	4.0	—	张文等,2014 ^[20]	磨溪39	20.0	—	胡安平等,2018 ^[23]
华蓥山地质公园	15.0	—	张文等,2014 ^[20]	南充1	16.0	—	胡安平等,2018 ^[23]
张村	84.0	热液	张文等,2014 ^[20]	七里23	18.4	—	张坤贞等,2019 ^[24]
广元杨家崖	31.0	—	张文等,2014 ^[20]	雷西1	4.8	—	张坤贞等,2019 ^[24]
广元长江沟	34.0	热液	张文等,2014 ^[20]	川付85	10.6	—	张坤贞等,2019 ^[24]
广元上寺	30.0	—	张文等,2014 ^[20]	川岳84	22.0	—	张坤贞等,2019 ^[24]
广元车家坝	5.0	热液	张文等,2014 ^[20]	普光5	11.6	—	张坤贞等,2019 ^[24]
广元西北乡	42.0	热液	张文等,2014 ^[20]	毛坝3	5.0	—	张坤贞等,2019 ^[24]
河6	5.0	—	张文等,2014 ^[20]	明1	26.0	—	张坤贞等,2019 ^[24]
卧115	26.0	热液	张文等,2014 ^[20]	雷北1	11.5	—	张坤贞等,2019 ^[24]
卧85	10.5	热液	张文等,2014 ^[20]	清溪3	16.8	—	张坤贞等,2019 ^[24]
通口	27.5	—	张文等,2014 ^[20]	泰来6	23.0	热液	胡东风等,2019 ^[25]
天井山阴泉山	5.0	—	张文等,2014 ^[20]	宝兴五龙	34.5	热液	本项目实测
松盖坪	9.0	—	张文等,2014 ^[20]	旺苍正源	4.0	—	本项目实测
绵竹高桥	15.5	—	张文等,2014 ^[20]	丰都放牛坝	25.0	热液	本项目实测
旺苍王家沟	1.7	—	张文等,2014 ^[20]	阆中1	25.0	—	井资料
吴家1	31.0	热液	张文等,2014 ^[20]	川深1	15.0	热液	井资料
矿2	44.0	热液	张文等,2014 ^[20]	永兴1	15.0	热液	井资料
双探1	22.0	—	宋晓波等,2016 ^[21]	关基	8.0	—	井资料

注:“—”表示非热液成因或成因尚不明确。

2 取样与测试

为了进一步理清热液白云岩化流体性质和来源,本次研究共搜集已发表9个钻井与露头的碳、氧同位素数据120组,7个钻井与露头的锶同位素数据61个。实测9个钻井与露头碳、氧同位素数据124组,6个钻井与露头的锶同位素数据32个。实测数据均根据热液白云岩结构特征,分别对灰岩原岩、基质白云岩和鞍形白云石进行了微区取样和测试。

研究中碳、氧同位素的检测根据DZ/T 0184.17—1997《碳酸盐矿物或岩石中碳、氧同位素组成的磷酸法测定》标准进行,使用20 mg的方解石或白云石粉末样品(200目)在25℃条件下分别与磷酸反应24 h或72 h,反应释放的CO₂通过Finnigan MAT-252型质谱仪测试获得同位素比值结果,所得出的用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值用Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)标准表示;锶同位素的检测根据GB/T 17672—1999《岩石中铅、锶、钍同位素测定方法》标准进行,使用100 mg的方解石或白云石粉末样品(200目)溶解于2 mL 6N的HCl溶液,在100~110℃条件下反应24 h,之后采用AG 50WX12 200~400目离子交换树脂层析柱处理溶液提取锶同位素,最后使用Finnigan MAT Triton TI型表面热电离质谱仪分析测试得出 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 比值。以上所有测试均在核工业北京地质研究院完成。

3 热液白云岩化类型

前人对四川盆地中二叠统白云岩做过大量岩石学和地球化学分析,在多个钻井和剖面中,见到了斑马纹结构,识别出了晶面呈马鞍状白云石和自生石英、萤石、黄铁矿等热液矿物。鞍型白云石普遍具有 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏离二叠系海水正常值、包裹体温度异常高等特点,均揭示了这些白云石普遍经历了热液改造。但是由于层位、岩相、岩性的不同,构造热液白云岩岩石学和地球化学特征有较大差异,对储层改造的意义不同。本文根据热液白云岩化的围岩性质不同将其分为3种类型,即滩相白云岩改造型热液白云岩化、岩溶灰岩改造型热液白云岩化和致密灰岩改造型热液白云岩化。

3.1 滩相改造型热液白云岩化

3.1.1 白云岩产状和岩石学特征

此类型白云岩主要分布在川西和川中地区,垂向

上集中发育在栖霞二段,其原岩主要为浅水、较高能环境下形成的滩相颗粒灰岩,在早成岩期仍能够保存有一定的孔渗性,滩体平面上主要在龙门山海槽东侧呈北东-南西向展布,而白云岩的分布和滩体的展布具有较高的重合性^[26],在川西北广元—剑阁一带和川西南宝兴—峨嵋一带厚度较大,白云岩体在宏观上主要呈厚层-块状分布(图2a),局部常见白云岩化不彻底形成的斑状白云岩(图2b),在川西南的大部分地区和川西北的局部地区常见斑马纹、水力破裂缝等热液相关构造(图2c)。

微观上,根据白云岩的产状、原始结构的保存程度、晶体习性等特征,可将基质白云岩划分出种3类型:粉-细晶残余结构白云岩(原始结构保留型)、细-中晶平直自形-半自形白云岩(原始结构破坏型)、细-粗晶非平直他形白云岩(原始结构破坏型),而孔洞缝中充填的胶结物白云石主要呈非平直晶面鞍形晶,仅见少量平直自形晶胶结物。

在粉-细晶残余结构白云岩中,白云岩化作用不彻底,内部常见有原始灰岩的颗粒结构残余,特别是仍能观察到如棘皮类、苔藓虫、腹足类等部分生物碎屑灰质残余,或者生物碎屑、内碎屑、似球粒等颗粒的幻影结构,白云岩化具有一定的基质选择性特征,残余的灰质成分多是一些未被完全云化的碎屑颗粒,而原始的基质部分大多已完全云化(图2d)。

在细-中晶平直自形-半自形白云岩中,原始灰岩结构已被完全破坏,白云石晶粒为细-中晶且常呈菱形并具有明显的雾心亮边结构,靠近孔隙周缘的白云石自形程度更好,孔隙中还常见有沥青充填,在川西北地区栖霞组此类白云岩内还多见到有溶蚀性孔洞发育,孔洞边缘呈不规则状(图2e),溶洞内部多见后期的白云石、方解石或石英等胶结物充填-半充填。

在细-粗晶非平直他形白云岩中,原始灰岩结构已被完全破坏,白云石晶体为细-粗晶,晶体紧密接触,晶面间呈弯曲式、镶嵌式接触关系,孔隙发育程度较差,部分晶体在正交偏光下呈弱波状消光特征,此类白云岩中常有不同规模的缝合线发育(图2f),从切割关系上来看,此类白云岩形成的时间早于缝合线形成的时间。

另外,胶结物白云石多以斑马纹、破裂缝及溶洞中的鞍形白云石产出,白云石晶体多呈粗晶-巨晶,晶面呈弯曲状、阶梯状,正交偏光下具有波状消光特征,并且常见鞍形白云石-方解石的充填序列(图2g),与其临近的基质白云岩也常遭受热液改造发生一定程度的重结晶,甚至具有了波状消光特征(图2h);同时,少量

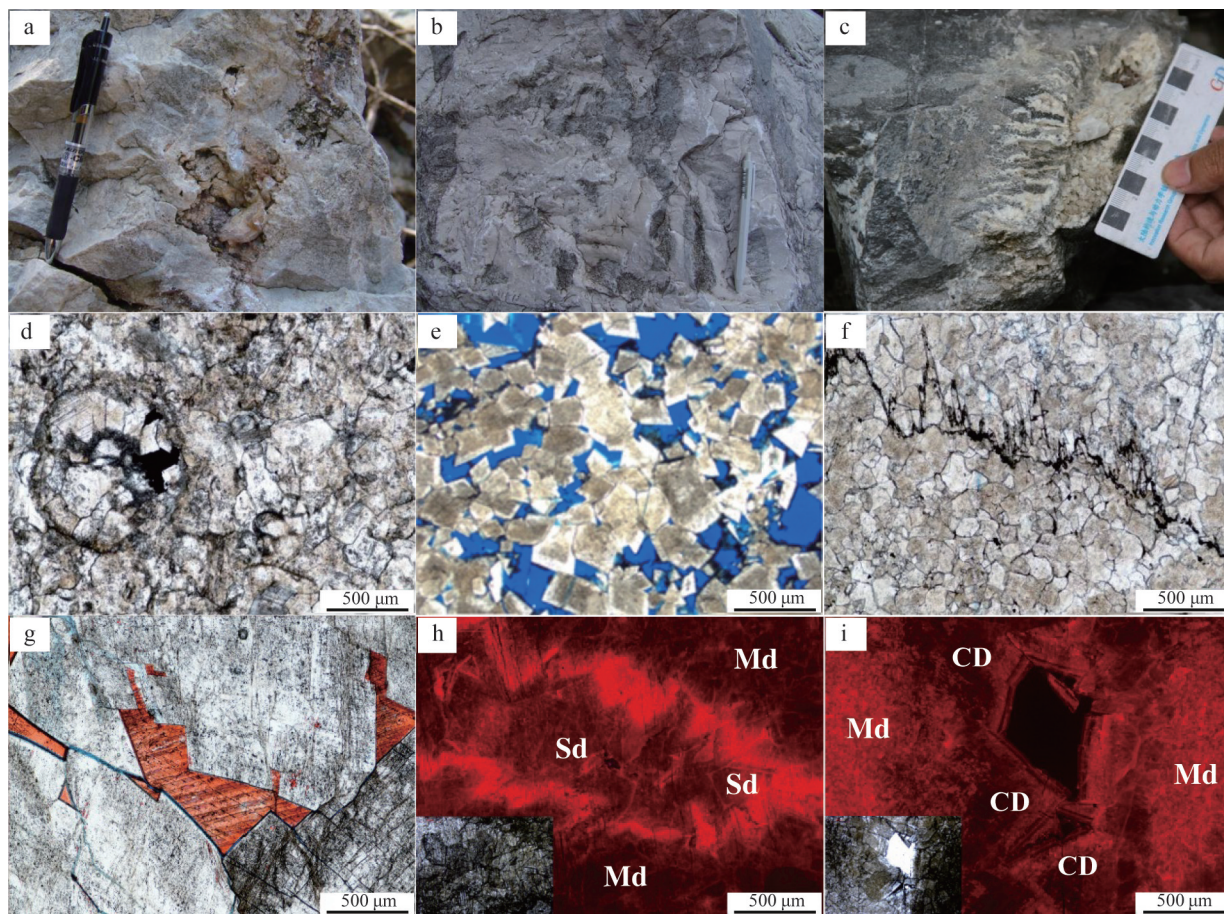


图2 川西地区中二叠统栖霞二段颗粒滩相白云岩及相关热液白云岩石学特征

Fig. 2 Images showing the petrological characteristics of the dolomite of grain beach facies and associated hydrothermal dolomite in the second member of Qixia Formation, Middle Permian, western Sichuan Basin

a. 浅灰色块状白云岩,发育不规则溶蚀孔洞(红色箭头所指),内部有方解石、沥青充填,广元长江沟剖面;b. 灰色斑状白云岩,基质灰岩为浅灰色,云斑为深灰色呈不规则拉长状,广元长江沟剖面;c. 浅灰色基质白云岩中的斑马纹构造,宝兴五龙剖面;d. 具有腹足类生屑幻影的白云岩,单偏光,ST3井,埋深7 430.9 m;e. 平直晶面自形中晶白云岩,雾心亮边结构明显,孔隙中常见沥青充填,单偏光,蓝色铸体,ST3井,埋深7 458.6 m;f. 非平直晶面他形细晶白云岩,伴有缝合线发育,单偏光,蓝色铸体,ST3井,埋深7 460.1 m;g. 裂缝中充填的鞍状白云石胶结物,晶面弯曲呈镰刀状,单偏光,茜素红染色,ST3井,埋深7 441.0 m;h. 溶洞内充填的鞍形白云石胶结物(Sd),周围基质白云岩(Md)也有遭受热液改造重结晶的特征,单偏光,宝兴五龙剖面;i. 溶洞中充填的平直自形-半自形中-粗晶白云石胶结物(CD),晶粒直径明显大于基质白云岩(Md),单偏光,ST3井,埋深7 449.1 m

孔洞中发育有平直晶面自形晶白云石胶结物,晶体呈中-粗晶,不具有波状消光特征(图2i)。

3.1.2 地球化学特征

通过对川西栖霞组各剖面、钻井基质灰岩、基质白云岩和鞍形白云石胶结物样品的地球化学分析发现:

基质灰岩的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 主要分布在 $1.6\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$,基本与同期海相碳酸盐岩碳同位素演化相一致,个别样品可能受到有机碳源的影响而表现出较负偏的 $\delta^{13}\text{C}$ ($-0.66\text{‰} \sim 0.77\text{‰}$),氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布范围则主要集中在 $-5.0\text{‰} \sim -8.9\text{‰}$,同时基质灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值主要分布在 $0.707\,156 \sim 0.708\,081$,大部分样品点仍处于同期海水范围内(图3)。

基质白云岩的碳、氧同位素分布范围变化较大,且在川西北和川西南地区表现出了较大差异,川西北地区的基质白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 主要分布在 $1.8\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$,与基质灰岩基本一致, $\delta^{18}\text{O}$ 主要分布在 $-5.9\text{‰} \sim -9.3\text{‰}$,相较基质灰岩略偏负, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布在 $0.707\,168 \sim 0.707\,923$,与基质灰岩接近;而川西南地区基质白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 略偏正,主要分布在 $2.8\text{‰} \sim 4.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 负偏明显,主要分布在 $-8.0\text{‰} \sim -12.4\text{‰}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值更高,主要分布在 $0.708\,166 \sim 0.711\,259$ 。

对于鞍形白云石,其碳、氧同位素比值在川西北和川西南地区也表现出了明显的差异性,川西北地区大部分鞍形白云石样品的碳氧同位素分布范围都与基质白云岩相似($\delta^{13}\text{C}=2.6\text{‰} \sim 5.1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-5.2\text{‰} \sim$

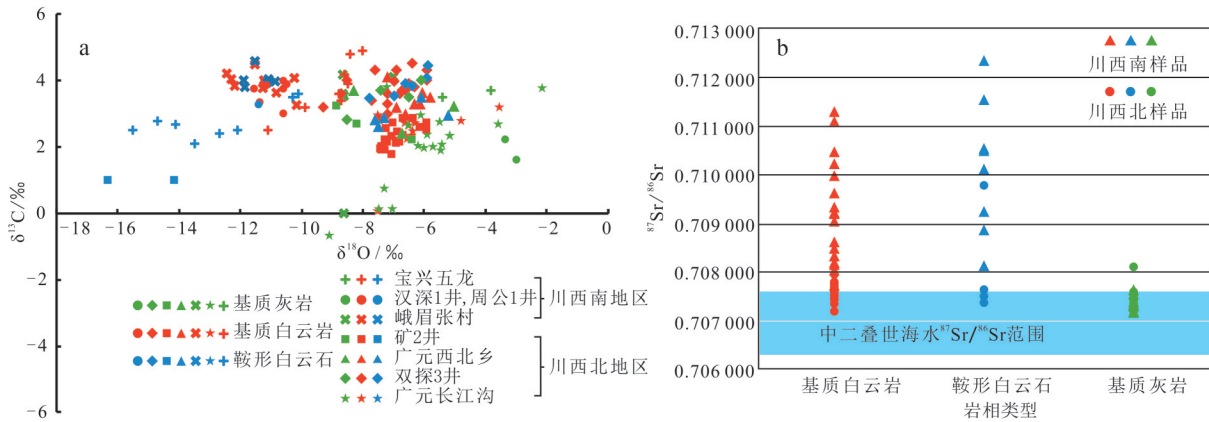


图3 川西地区中二叠统滩相灰岩及相关热液白云岩层碳、氧同位素(a)和锶同位素(b)特征(部分数据引自文献[13,17,19,22,27-28])

Fig. 3 Carbon oxygen isotope (a) and strontium isotope (b) characteristics of beach facies limestone and associated hydrothermal dolomites, Middle Permian, western Sichuan Basin (partially modified after references [13,17,19,22,27-28])

-8.5 ‰, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.707\ 350 \sim 0.707\ 601$), 仅个别样品具有明显负偏的 $\delta^{13}\text{C}$ (1.01 ‰) 和 $\delta^{18}\text{O}$ (-16.3 ‰) 以及较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.709 759)^[10]; 而在川西南地区, 鞍形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要分布在 2.1 ‰ ~ 4.6 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ 更负偏, 主要分布在 -10.1 ‰ ~ -14.7 ‰, 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围较宽 (0.708 101 ~ 0.712 303), 但都明显高于同期海水的锶同位素比值, 显示流体主要来自壳源而非幔源。

3.1.3 白云岩化模式

综合以上分析发现, 对于川西地区中二叠统白云岩, 颗粒滩是白云岩发育的物质基础, 白云岩的分布与滩相颗粒灰岩的展布具有高度重合性。在残余结构白云岩中, 常可观察到各类生物碎屑、内碎屑、似球粒等颗粒的残留或者幻影结构, 在紧邻白云岩的基质灰岩部分, 其岩性也以颗粒灰岩为主, 由于颗粒滩相灰岩早期具有较高的原始孔隙度, 更有利于后期白云岩化流体的进入, 原始颗粒灰岩中粒间孔、粒内孔、粒间溶孔及铸模孔在白云岩化作用后很可能会以晶间孔、晶间溶孔的形式在原位置继承下来^[23], 因而部分白云岩中还能观察到一些原始的残余颗粒结构。

而四川盆地中二叠统规模性白云岩的形成, 与晚二叠世初期 (约 260 Ma) 峨嵋地幔柱的隆起以及峨嵋山玄武岩的“大规模”喷发有关, 这次热事件使得四川盆地在晚二叠世初具有异常高的古热流值^[29], 尤其在靠近川西南峨嵋山玄武岩喷发中心的地区以及活动性的深大断裂附近具有异常高的古地温。这次异常热事件克服了白云岩形成的动力学屏障, 在晚二叠世初期浅埋藏的环境下发育了大规模白云岩体^[12]。但是在

白云岩化作用过程中原岩性质、镁离子的来源、流体作用方式等方面, 川西南和川西北地区白云岩表现出了较大的差异性 (图 4 中模式 b)。

在川西北地区, 以广元上寺长江沟、广元西北乡和双探 3 井等钻井和剖面为代表, 地球化学显示这些地区的白云岩化流体的来源与川西南存在较大差异, 大部分基质白云岩都具有和基质灰岩接近的碳、氧、锶同位素比值和稀土元素配分模式^[13,17], 说明白云岩化流体很可能是海源流体而并非深部热液流体, 而同时基质白云石也具有较粗的晶粒结构和异常高的包裹体均一化温度, 说明白云岩并非准同生期形成, 但研究发现即使是遭受后期改造较弱的平直自形-半自形基质白云石其包裹体均一化温度也能达到 90 ~ 120 °C^[12], 这并非是正常埋深过程中地温逐渐升高所致, 而是由于川西北地区在晚二叠世初期 (中二叠统栖霞组处于浅埋藏期) 具有异常高的古热流值, 使得该地区古地温较高, 当地层温度克服了白云石形成的动力学屏障后, 通过海源流体的供给在浅埋藏环境下形成了大规模的白云岩。因此, 川西北地区的大部分基质白云岩的形成都与热液作用没有直接关系, 晚二叠世初期峨嵋地幔柱隆起导致的异常热事件只为白云岩形成提供了所需的能量, 而白云岩化最重要的物质来源, 即镁离子来源, 则主要由海水提供, 典型的热液白云岩化流体活动在川西北地区的分布非常局限, 仅在部分孔洞缝中的鞍形白云石胶结物产出, 且具有高温度高盐度特征^[30], 或者仅对裂缝周围范围内的基质白云岩改造使其发生重结晶。

在川西南地区, 以宝兴五龙、峨嵋张村和汉深 1 井等钻井和剖面为代表, 靠近峨嵋山玄武岩的喷发中

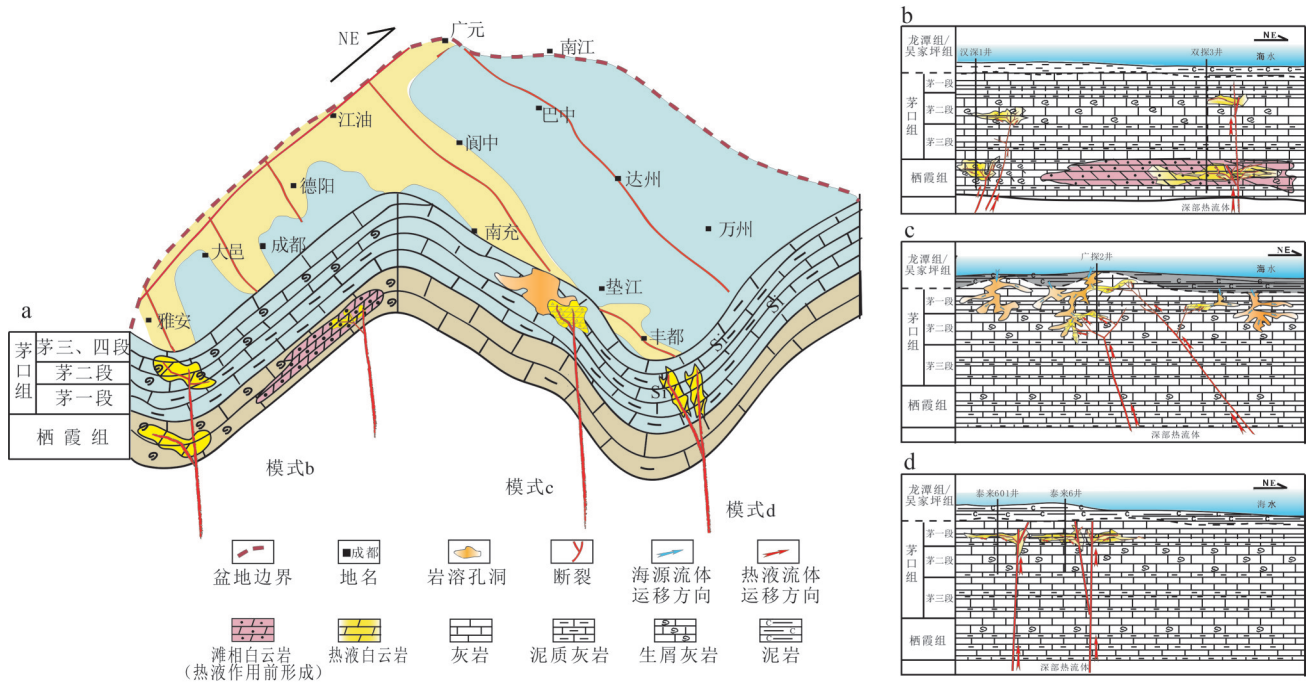


图4 四川盆地中二叠统热液白云岩化模式

Fig. 4 Hydrothermal dolomitization models in the Middle Permian, Sichuan Basin

a. 热液白云岩化模式; b. 滩相改造型; c. 岩溶灰岩改造型; d. 致密灰岩改造型

心,异常热事件对白云岩化过程的影响更为明显,常见与断裂-热液作用相关的斑马纹、水力破裂缝及爆裂角砾等现象,大部分基质白云岩都具有细-粗晶非平直晶面他形晶特征,且由于受热分馏效应的影响,基质白云岩和鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 相对于基质灰岩明显负偏(图3),而且根据包裹体测温显示,鞍形白云石和非平直他形基质白云石的均一化温度主要分布在 $136 \sim 255\text{ }^{\circ}\text{C}$,远高于浅埋藏期的地层温度(根据缝合线对鞍形白云石和基质方解石的切割关系,白云岩的主要形成阶段早于浅埋藏期)^[18],另外基质白云岩和鞍形白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值也远高于基质灰岩,据此推断白云岩化流体主要来源于深部壳源的热液流体,随着流体自下而上运移并沿断层和裂缝渗入高孔渗的颗粒滩相灰岩中,使围岩发生了白云岩化,热液流体首先对围岩进行交代并形成非平直他形基质白云岩,同时在前期断裂作用形成的斑马纹、水力破裂缝、溶蚀孔洞中主要发生胶结作用,沉淀了大量的鞍形白云石胶结物,另外孔洞缝内还常见少量萤石、石英等热液矿物充填。

3.2 岩溶灰岩改造型热液白云岩化

3.2.1 白云岩产状和岩石学特征

此类白云岩主要发育在川中地区茅口组中上部,

以广参2井、广探2井、南充1井为代表。受晚二叠世末期东吴运动影响,茅口组顶部发育了早成岩期层控岩溶系统^[31-32],在此之上叠加了后期的构造-热液白云岩化,形成了岩溶灰岩改造型的热液白云岩。川中地区中二叠统白云岩主要分布在广安-南潼一带(岩溶高地-岩溶斜坡区域),集中发育在茅三段和茅二段上部,白云岩层段厚度一般在几米到十几米,最厚可达31 m(广探2井),白云岩体的产状与岩溶系统关系密切。

宏观上,白云岩体常表现为层状、似层状、透镜状、团块状,内部常可观察到充填一半充填的溶孔溶洞(图5a)、岩溶角砾(图5b—d)、水力破裂缝(图5e—g)等现象,孔洞系统内发育有自形程度较高的鞍形白云石(图5a),还能观察到伴生的石英、萤石等矿物,部分岩溶灰岩经历的白云岩化作用不彻底,发育有灰质角砾和云质的孔洞充填物(图5b—d),岩溶系统的云化程度表现出较大的差异性。

微观上,基质白云岩主要可划分为两类,一类是云化不彻底的残余灰质白云岩,晶体主要呈平直自形-半自形细晶结构,晶间常有未被完全云化的泥晶基质或有孔虫、苔藓虫等生屑灰质残余(图5h);另一类是云化较彻底的晶粒白云岩,晶体呈平直半自形-非平直他形中-细结构,常具有雾心亮边特征,并发育有一定规模的晶间孔,其内部常有沥青充填(图5i)。而胶结物白云石则以鞍形白云石为主,晶体较粗、自形程度

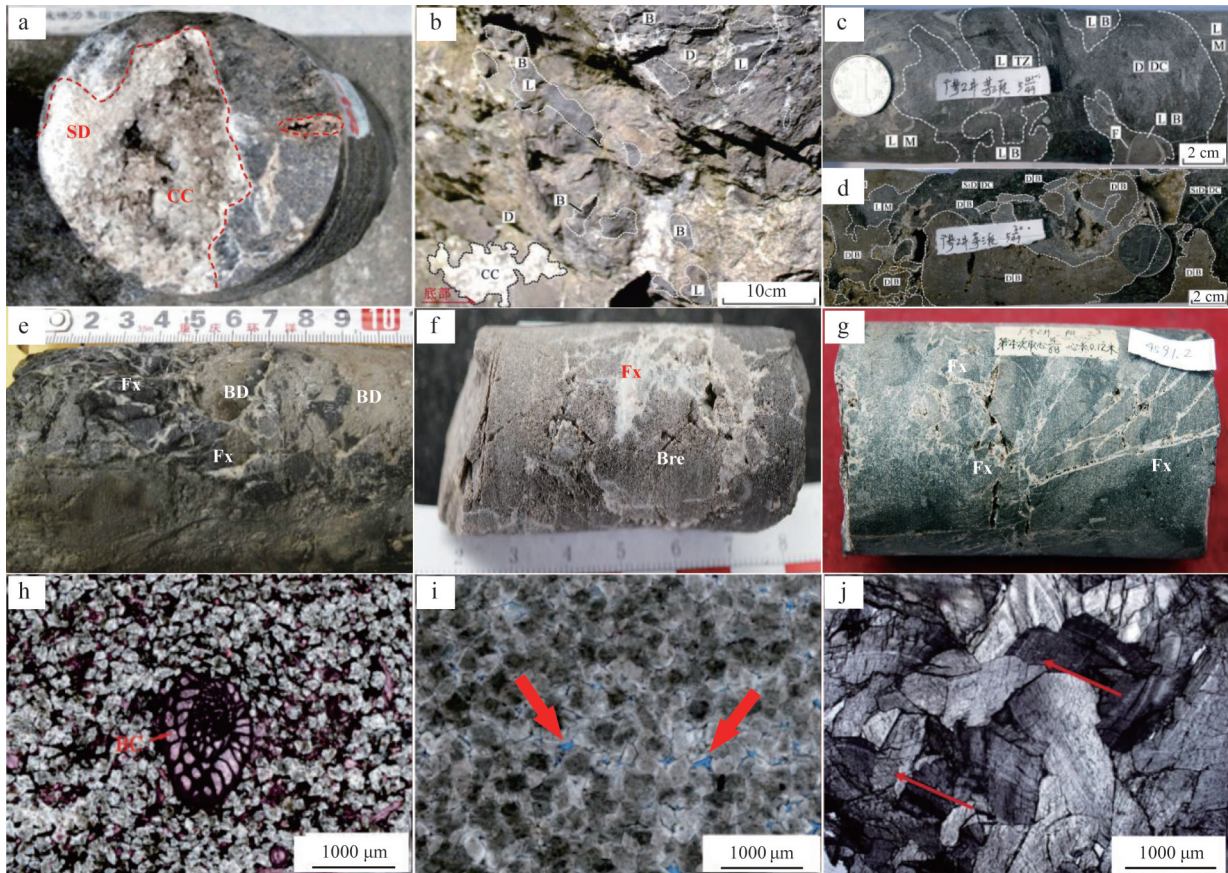


图5 川中地区中二叠统岩溶灰岩及相关热液白云岩岩石学特征

Fig. 5 Petrological characteristics of karstified limestone and associated hydrothermal dolomite in the Middle Permian, central Sichuan Basin

a. 深灰色白云岩间发育的溶洞(红色虚线内),内部见乳白色鞍形白云石(Sd)-方解石(CC)半充填,埋深4 705.27 m,广参2井,茅二段,据汪华等^[11]; b. 角砾灰岩(LB)与角砾间的云质充填(D),见方解石充填(CC)的溶洞发育,邻水黄孔槽剖面,茅口组,据刘宏等^[33]; c. 溶洞(DC)中的灰质角砾(LB)和云质充填(D),埋深4 606.98 m,广参2井,茅三段,据刘宏等^[33]; d. 溶洞(DC)中的云质角砾(DB)和硅质白云岩(SiD)充填,大量溶孔溶洞发育,埋深4 605.62 m,广参2井,茅三段,据刘宏等^[33]; e. 角砾白云岩(BD),角砾间为硅质岩和生屑灰岩,不规则水力破裂缝(Fx)发育,埋深4 591.50 m,广参2井,茅三段,据陈轩等^[13]; f. 深灰色细中晶白云岩内发育水力破裂缝(Fx)和爆裂角砾(Bre),鞍形白云石充填,埋深4 591.20 m,广参2井,茅三段,据汪华等^[11]; g. 白云岩角砾和伴生的不规则水力破裂缝(Fx),溶孔溶洞发育,二崖剖面,茅口组,据汪华等^[11]; h. 残余灰质细-中晶白云岩,内部见灰质蜓类生屑,茜素红染色,单偏光,二崖剖面,据刘建强等^[16]; i. 细-中晶基质白云岩,白云石晶粒具有雾光亮边结构,发育部分晶间孔(红色箭头),单偏光,二崖剖面,据刘建强等^[16]; j. 溶洞内充填的粗-巨晶鞍形白云石,波状消光特征明显(红色箭头),广参2井,埋深4 612.00 m,茅三段,据陈轩等^[14]

较好,常充填在溶沟、溶洞、水力破裂缝及“漂浮状”岩溶角砾之间(图5j)。

3.2.2 地球化学特征

通过对川中茅口组各钻井中基质灰岩、基质白云岩和鞍形白云石胶结物样品的地球化学分析发现:

基质灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围在1.6‰~4.5‰,平均值为3.0‰,而 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布范围较宽,在-2.8‰~-7.1‰,平均值-5.5‰,部分灰岩样品可能是在后期受重结晶或热液流体影响较大,因而 $\delta^{18}\text{O}$ 值较该地区原始海水标准值明显负偏,王珏博等(2016)对泥晶灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行校正后认为其分布范围应在-0.17‰~

-4.53‰^[34];相较于基质灰岩,基质白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更偏正,主要分布在2.9‰~5.3‰($\delta^{13}\text{C}$ 平均值3.7‰),而 $\delta^{18}\text{O}$ 值更偏负,主要分布在-4.1‰~-9.5‰($\delta^{18}\text{O}$ 平均值-6.2‰),其中非平直他形白云石相较于平直自形-半自形白云石具有更负偏的 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[8];鞍形白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为3.1‰~3.8‰,平均值为3.4‰; $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围为-7.4‰~-8.3‰,平均值为-7.9‰(图6a)。

在锶同位素比值变化上(图6b),基质灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低,主要分布在0.707 076~0.707 536,基本都处于二叠纪同期海水的锶同位素范围内,而基质白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布在0.707 654~0.7101 740,明显高于基质灰岩,鞍形白云石胶结物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值特

征类似于基质白云岩,主要分布在 0.707 737 ~ 0.709 453。

3.2.3 白云岩化模式

综合以上分析认为,川中地区中二叠统白云岩主要与茅口组顶部的岩溶系统相伴生,受中二叠世末期东吴运动的影响,茅口组顶部遭受暴露剥蚀形成了多样的岩溶系统,溶洞、溶沟及裂缝发育,内部常有岩溶角砾、碳酸盐碎屑、铝土质等物质充填^[15],这类岩溶系统能够为后期断裂控制的埋藏白云岩化提供有利条件^[36]。在晚二叠世初期,伴随着峨嵋地幔柱的隆起和大规模玄武岩的喷发,盆地经历了强烈的伸展张裂作用,深部热液沿张性断裂向上运移进入岩溶系统,与孔洞中残存的原始流体混合,为规模性白云岩的形成提供了物质条件(部分镁离子来源)和热/动力学条件(图4中模式c)。

通过地球化学分析发现,原始的基质灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较大,特别是岩溶系统有关的部分基质灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值较正常海水标准值明显负偏^[14-16,34-35,37],说明其可能遭受了后期热液改造或发生了重结晶;基质白云岩发育的结构类型多样,从平直自形-半自形晶到非平直他形晶都有发育,相较于基质灰岩,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值更偏正, $\delta^{18}\text{O}$ 值更偏负(其中,广参2井基质白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏最严重,说明其经历的热分馏效应更明显), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也更偏高,同时基质白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值没有非常集中分布的范围,而是都具有较宽的变化区间($\delta^{18}\text{O}$ 最负可达-8.4‰, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 最高可达0.710 174,和鞍形白云石接近),这说明基质白云岩的形成过程是多阶段的,对应的白云岩化流体是混源的,主要来源于深部热液和岩溶系统中残留的海源流体;对于孔

洞缝内普遍发育的鞍形白云石胶结物,虽然其具有相对较高的包裹体均一化温度和负偏明显的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,但其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围较宽,说明深部热液流体并不是鞍形白云石的唯一来源,在其沉淀过程中也有原始岩溶系统中残余流体的参与。

另外值得注意的是,这种模式下的白云岩化作用并没有表现出明显的对原始基质灰岩岩石结构的选择性,无论是高能的滩相颗粒灰岩还是低能的深色灰泥灰岩后期都可以发生白云岩化,白云岩的分布主要受控于早期岩溶系统的发育程度,以及和后期断裂-热液活动的匹配关系。

3.3 致密灰岩改造型热液白云岩化

3.3.1 白云岩产状和岩石学特征

在川东南丰都放牛坝、丰都狗子水、华蓥山二崖和泰来6井等钻井和剖面中,中二叠统茅口组中上部有层状-似层状白云岩发育,其围岩主要为较致密的瘤状灰岩、灰泥灰岩、粒泥灰岩,多见硅质条带和硅质结核,原始物性较差,且该地区未见有明显的早期岩溶系统发育,白云岩体的分布主要是受断裂控制,并发育有典型的热液活动标志^[2,38]。

通过露头剖面和岩心观察可知,白云岩层段厚度一般在十余米至二十余米不等,宏观上主要呈不规则的似层状、透镜状,与基质灰岩接触面不平整,白云岩层内部常可见斑马纹、水力破裂缝、爆裂角砾、溶孔溶洞等现象,并依次可见基质白云石-鞍形白云石-方解石的充填序列,许多充填-半充填的溶孔溶洞中还可可见晶体形态较好的柱状石英充填(图7d),部分地区还可见到热液交代形成斑状白云岩特征^[39]。

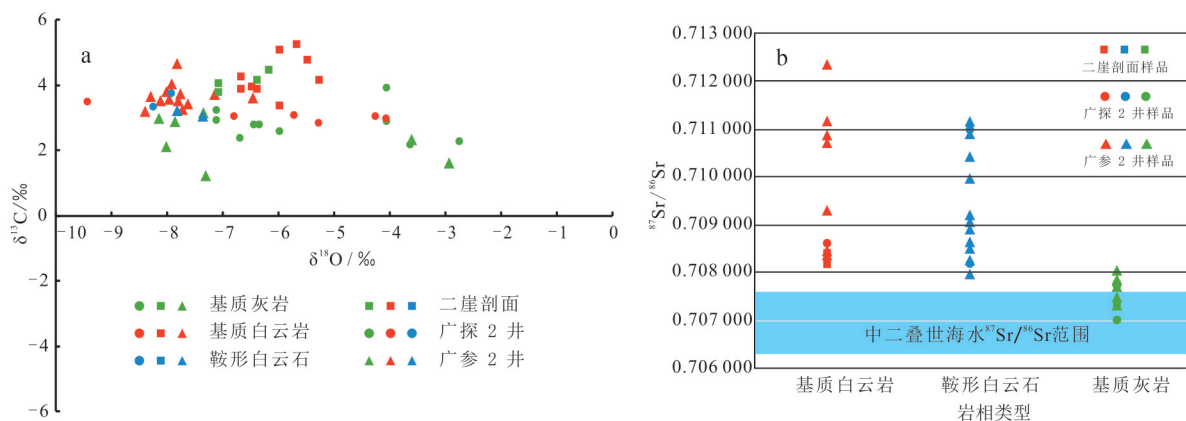


图6 川中地区中二叠统岩溶灰岩及相关热液白云岩的碳、氧同位素(a)和锶同位素(b)特征(部分数据引自文献[14-16,34-35])

Fig. 6 Carbon oxygen isotope (a) and strontium isotope (b) characteristics of karstified limestone and associated hydrothermal dolomite in the Middle Permian, central Sichuan Basin (partially modified after references [14-16,34-35])

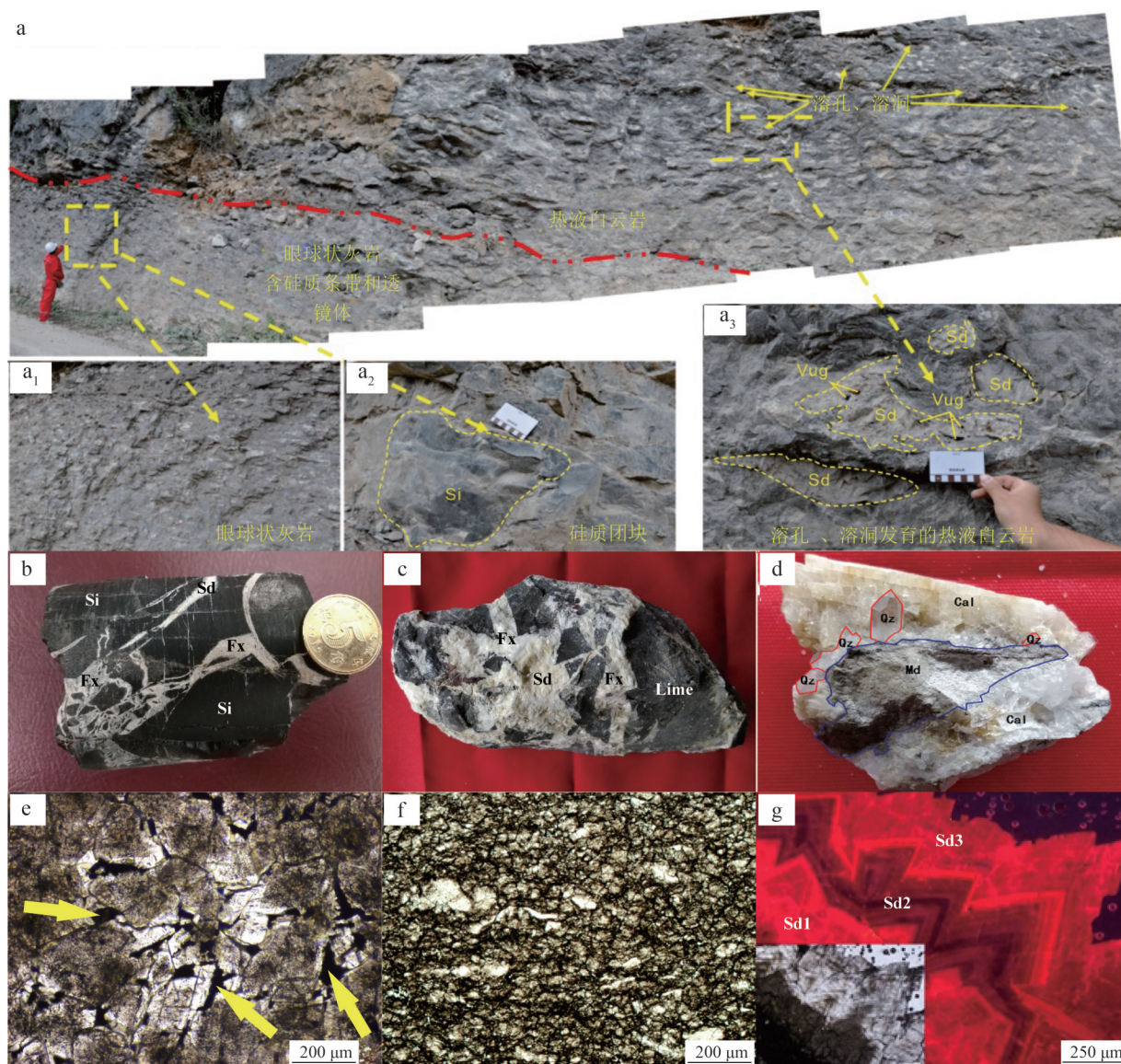


图7 川东地区中二叠统致密灰岩及相关热液白云岩岩石学特征

Fig. 7 Petrological characteristics of Middle Permian tight limestone and associated hydrothermal dolomite, eastern Sichuan Basin

a. 白云岩层系和基质灰岩的产状关系,接触界面不平整,围岩主要是相对深水沉积的眼球状灰岩(a_1)、硅质灰泥灰岩(a_2)等,白云岩层段内部多溶孔、溶洞发育(a_3),茅三段,丰都狗子水剖面;b. 硅质白云岩内发育的水力破裂缝(Fx),缝内有鞍形白云石(Sd)充填,埋深5 510.6 m,茅三段,泰来6井;c. 基质灰岩中发育的水力破裂缝(Fx),粗晶-巨晶鞍形白云石(Sd)充填,茅三段,丰都狗子水剖面;d. 沿基质白云岩(Md)边缘溶洞壁生长的石英晶体(Qz)和方解石胶结物(Cal),石英呈柱状、晶型完好,茅三段,丰都狗子水剖面;e. 中-细晶基质白云岩,平直半自形-非平直他形晶,晶间有沥青充填(黄色箭头),单偏光,茅三段,丰都狗子水剖面;f. 细粉晶白云岩,晶间泥质含量较多,仍能观察到一定的定向性,单偏光,茅三段,丰都狗子水剖面;g. 粗晶鞍形白云石胶结物的阴极发光图像,可见多期次生长环带(Sd1-Sd2-Sd3),晶面呈弯曲状,左下小图为对应的单偏光照片,埋深5 530.4 m,茅三段,泰来601井

微观上,基质白云岩主要可以划分出两种类型,中-细晶基质白云岩和纹层状粉-细晶基质白云岩。在中-细晶基质白云岩中,白云石晶体以呈半自形-他形为主,少量自形,直径一般在 $50 \sim 300 \mu\text{m}$,部分较粗的白云石晶体具有雾心亮边结构,偶见生物碎屑的残余、幻影结构,内部有一定的晶间孔、晶间溶孔发育;纹层状粉-细晶基质白云岩在手标本上颜色较深且常能观察到纹层状结构,镜下可见白云石晶体主要

呈半自形-他形,直径一般在 $30 \sim 100 \mu\text{m}$,晶体表面较污浊,晶体间仍保存有少量的灰泥或泥质残余,颗粒排列仍保持了一定的定向性,内部常可见一些已云化的海百合茎单晶和泥晶球粒。鞍形白云石胶结物也较为常见,多为中粗晶-巨晶,直径 $0.2 \sim 2.0 \text{ mm}$,露头 and 岩心上常以乳白色胶结物形式充填于斑马纹、水力破裂缝、爆裂角砾周缘,正交偏光下见明显波状消光特征。

3.3.2 地球化学特征

通过对川东南茅口组各钻井中基质灰岩、基质白云岩和鞍形白云石胶结物样品的地球化学分析发现:

基质灰岩、基质白云岩和鞍形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异不大,大部分集中在2‰~5‰的区间内,其中基质灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在2.8‰~5.5‰,平均值3.4‰,而基质白云岩和鞍形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则分别处在1.4‰~3.7‰(平均值3.2‰)和2.8‰~3.9‰(平均值3.3‰)(图8a)。而在 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布特征上,基质白云岩和鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相较于基质灰岩发生了明显的负偏,基质灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布范围在-3.9‰~-6.5‰,平均值-5.0‰;基质白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则分布在-6.8‰~-9.3‰,平均值-7.6‰,其中中-细白云石相较于纹层状细-粉晶白云石具有更负偏的 $\delta^{18}\text{O}$ 值;鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围为-6.8‰~-8.8‰,平均值为-7.8‰。

在锶同位素比值变化上(图8b),基质灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低,主要分布在0.707 013~0.707 203,处于二叠纪同期海水的锶同位素范围内,而基质白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较高,主要分布在0.707 902~0.709 203范围内,鞍形白云石胶结物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值类似于基质白云石,主要分布在0.707 947~0.708 458。

3.3.3 白云岩化模式

综合以上分析认为,川东南地区中二叠统茅口组白云岩具有典型的埋藏期构造-热液白云岩化特征,其原岩主要为一套深水沉积的致密灰岩。白云岩层系通常发育在茅二段-茅三段,围岩岩性主要为外缓坡较深水环境下沉积的暗色瘤状灰岩、硅质灰岩、灰泥灰

岩等,其本身在早成岩期抗压实能力差通常较为致密,即使在浅埋藏期也并非高孔渗层,同时由于沉积水体较深,一般不具有发生与海源流体相关的准同生白云岩化的条件。通过岩相学观察也能发现,部分细-粉晶基质白云岩具有纹层状结构,同时内部泥质含量较高,还可见少量的云质棘皮类生屑等标志,这也说明此类白云岩的先驱灰岩是在较低能环境下沉积的灰泥灰岩或粒泥灰岩。

在白云岩化流体的来源方面,深部壳源热液是最主要的镁离子来源,基底断裂及其伴生的裂缝系统是最重要的流体流动通道,在构造应力和热浮力驱动下向上部运移,直至盆地浅部压力释放、流体卸载。在露头 and 岩心上,常可以发现代表热液活动的斑马纹结构、爆裂角砾、水力破裂缝等特征,孔洞中还发现有石英、萤石、闪锌矿等热液矿物充填。通过地球化学分析发现,相较于基质灰岩,基质白云岩和鞍形白云石由于热分馏效应明显所以都具有显著负偏的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,另外基质白云岩和鞍形白云石较同期海水更偏高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也说明热液流体可能是壳源性质的(流体与富含壳源锶的深部碎屑岩地层发生了充分的相互作用因而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值更高)。由于围岩较为致密,因而原始孔隙中残余流体的影响甚至可以忽略不计,白云岩化流体主要来源于深部热液。同时,对比发现鞍形白云石和基质白云石具有非常相似的碳氧锶同位素分布特征,包裹体均一化温度的分布期次也较为接近^[18],说明两者很可能是在同源流体作用下形成的,只不过基质白云岩主要是以热液对围岩交代方式形成,而鞍形白云石则主要以孔洞缝系统中的胶结物形式产出(图4中模式d)。

此次热液活动很可能也是与晚二叠世初期峨眉山

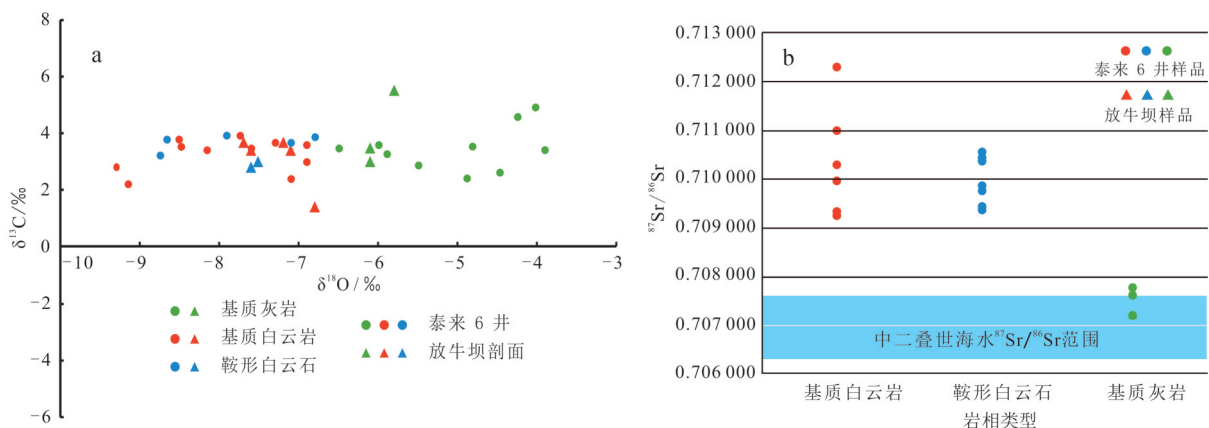


图8 川东地区中二叠统致密灰岩及相关热液白云岩的碳氧同位素(a)和锶同位素(b)特征(部分数据引自文献[25])

Fig. 8 Carbon oxygen isotope (a) and strontium isotope (b) characteristics of tight limestone and associated hydrothermal dolomite in the Middle Permian, eastern Sichuan Basin (partially modified after reference [25])

玄武岩喷发产生的异常热事件有关,此时盆地的张性断裂活动表现最强,古热流值达到最高峰,与岩浆活动有关的热液流体沿着张性基底断裂体系进入到茅口组致密灰岩地层中,并发生了典型的热液白云岩化作用^[3]。

4 热液白云岩化作用的储层改造意义

埋藏背景下,构造-热液白云岩化作用的发生需要具备区域性异常高温流体、大型的断裂输导通道和充沛的镁离子来源等条件^[2,38,40-41],四川盆地中二叠统热液白云岩的形成与峨眉地幔柱的隆升及其引起的异常热事件存在密切联系。中、晚二叠世,由于峨嵋地幔柱的隆起在扬子地台西南缘造成了地壳的大幅抬升和差异剥蚀,在四川盆地主要表现为茅口组顶部岩溶风化壳的形成^[42-44],随后峨眉山玄武岩开始大规模喷发,盆地的古热流值也达到最高(约259 Ma,盆地古热流值达到60~80 mW/m²,最高可达100 mW/m²)^[29],以及同时期盆地拉张性基底断裂的发育,促使了构造-热液白云化作用的发生。

从白云石形成的动力学角度来看,化学计量性白云石的形成需要成岩流体的温度和 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值达到适合的匹配条件,成岩系统的温度越高,形成白云石所需的流体 Mg^{2+}/Ca^{2+} 值的下限越低^[36];而从物质平衡的角度来看^[45-46],持续性的流体供给对规模性白云岩的形成至关重要,高能滩相颗粒灰岩和岩溶缝洞体在成岩早期都能保存较高的孔渗性,在准同生-浅埋藏环境下开放-半开放的成岩体系有利于后期流体的进入和排出,从而更易于形成规模性白云岩。因此可推断,在靠近峨嵋山玄武岩喷发中心的区域以及此时盆地张性深大断裂活动的区域,由于更靠近热源具有更高的古热流值,因而更易克服白云石形成的动力学屏障,而对于白云岩化流体,无论是来源于深部的热液流体还是孔隙残余流体或者海源流体,在较高成岩温度背景下都有发生白云岩化的可能。但值得注意的是,并非此时期在这次异常热事件影响下形成的所有白云岩体都可以被定义为热液白云岩,特别是对于川西北-川中栖霞组规模性颗粒滩相层状-块状白云岩,其地球化学特征上仍具有明显的海源流体性质而非热液成因,后期局部的热液白云岩化作用仅是对滩相白云岩的再次改造。

从热液白云岩赋存的原岩性质来看,无论是物性好的储层还是物性差的储层都可能受到改造,热液白云化作用发生时,栖霞组整体已处于浅埋藏成岩背景下,热液流体更易于沿着断裂附近的高孔渗层发生侧

向运移进而改造储层;而茅口组上部地层(尤其指热液白云岩较为发育的茅二段顶部-茅三段位置)此时更接近地表环境,局部还受到东吴运动形成的岩溶风化面影响,热液流体更易于在近地表位置卸载,直接改造低能相的灰岩围岩,或者进入到岩溶系统与原始孔洞内残余流体混合进而改造储层。虽然热液白云岩化作用本身并未表现出明显的基质选择性,但是其改造的程度和结果与原岩性质有关,颗粒滩相灰岩或云岩及岩溶灰岩自身储集性能好,热液改造后依然会残留较多的孔隙,而致密灰岩本身原始物性较差,受断裂作用影响易于形成裂缝性储层,同时沿裂缝系统运移的热液白云化流体也可以改造围岩并能够增加一定孔隙度。具体而言:

1)对于川西栖霞组的滩相改造型热液白云岩化作用,虽然在川西北发现了孔隙型白云岩储层,但大部分基质白云岩的形成时间都较早且具有海源流体的性质,早期的海水白云化可以优化孔隙结构^[47-48],大量晶间孔、晶间溶孔等储集空间也于此时形成,并没有与热液作用表现出明显关联;而在川西南典型热液成因的非平直他形基质白云岩中,仅有少量残余晶间孔发育。热液白云岩化改造作用主要表现为直接以孔洞缝中鞍形白云石胶结物产出从而堵塞孔隙,仅发育少量未被完全充填的残余孔洞(图9a),或者使原始的基质白云岩发生重结晶(图9b),因而并未表现出明显的建设性,甚至是主要为破坏性的成岩作用(图9a,b)。

2)对于川中茅口组顶部的岩溶灰岩改造型热液白云岩,原始灰岩由于表生岩溶的影响多发育溶沟、溶洞和岩溶角砾等构造,具有一定的储集空间,在后期热液白云岩化改造过程中,白云化流体沿岩溶系统进入储层与原始孔隙流体混合,使围岩发生了不同程度的白云岩化,但其形成的基质白云岩通常晶粒较细且具有较高含量的灰质残余(图5h),孔隙发育程度较差,同时还常见白云石多以中-粗晶胶结物形式充填于早期的孔洞系统内,主要的储集空间类型仍然是未被完全充填的早期岩溶孔洞缝(图9c,d),因此热液白云岩化对储层的建设性作用也不明显,甚至是破坏性的。

3)对于川东南茅口组的致密灰岩改造型热液白云岩,原始灰岩主要为低能相沉积、物性较差,其首先受构造作用影响发育断裂裂缝系统,沿断裂运移的深部热液流体一般也具有超压,从而进一步改造围岩形成水力破裂缝、爆裂角砾和斑马纹等构造,同时此地区的热液白云化流体除了交代基质灰岩外还表现出了一定的溶蚀性,围岩中多有不规则的溶孔、溶洞发育,孔洞系统中常可见晶形较好、均一化温度很高的热液石英

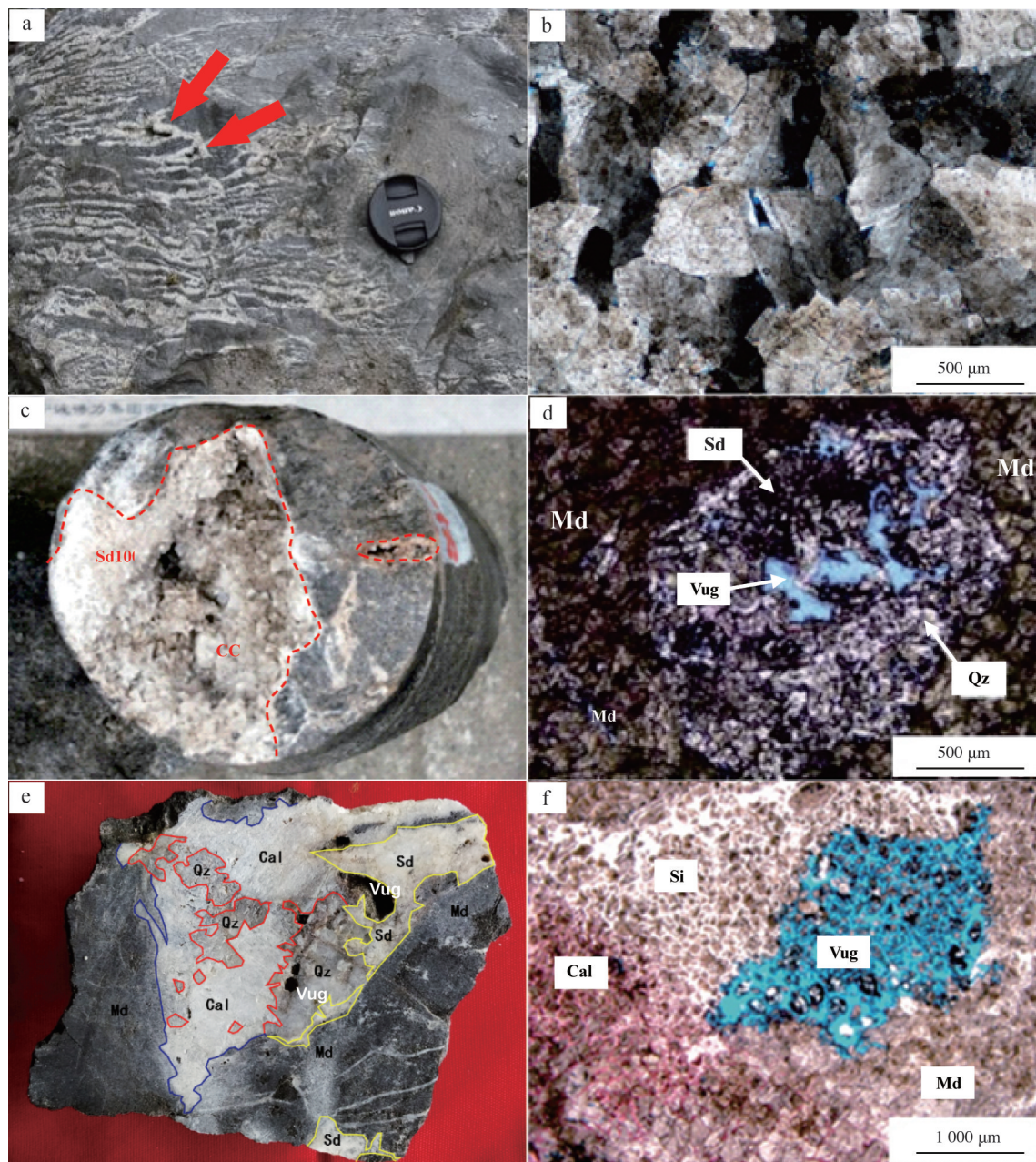


图9 四川盆地中二叠统热液白云岩化对储层的改造特征

Fig. 9 Images showing characteristics of reservoir quality improvement by hydrothermal dolomitization in the Middle Permian, Sichuan Basin
a. 厚层-块状基质白云岩,斑马纹发育,其内部大部分被鞍形白云石充填,孔洞发育程度较差,仅有少量残余孔洞,栖霞二段,宝兴五龙剖面;b. 热液改造重结晶的基质白云岩,白云石晶体具有弱波状消光特征,仅有少量晶间孔发育,正交偏光,埋深7 442.5 m,栖霞二段,双探3井;c. 基质白云岩中溶洞发育,内部见自形晶鞍状白云石(Sd)-方解石(CC)半充填,埋深4 705.3 m,茅二段,广参2井;d. 基质白云岩(Md)内发育的溶洞,内部充填的鞍形白云石(Sd)和石英晶体(Qz),单偏光,蓝色铸体,茅二段,黄孔槽剖面(据刘宏等^[8]);e. 基质白云岩(Md)溶洞中发育的鞍形白云石(Sd)、方解石(Cal)、石英晶体(Qz)和晶间溶孔(Vug),茅三段,丰都狗子水剖面;f. 硅质白云岩中发育的晶间溶孔,单偏光,蓝色铸体,茅三段,丰都狗子水剖面(据胡东风等^[18])

发育,说明后期的热液流体可能偏酸性,有能力对围岩进行溶蚀,这类储层的储集空间除裂缝外主要还包括沿裂缝边缘发育的不规则溶孔、溶洞(图9e,f),热液白云岩化作用具有明显的建设性,但现今这些孔洞常被之后埋藏成岩期形成的方解石充填-半充填(图9e)。

5 结论

1) 四川盆地中二叠统热液白云岩的发育受峨眉山玄武岩喷发引起的古热流增高和同期古断裂分布的控制,热液白云岩化与地层时代和围岩岩性没有明显的

相关性,沿断裂呈似层状、透镜状分布。

2)根据围岩和储层改造程度的差异,可以将热液白云岩化作用的改造模式分为3种:①高能滩相白云岩或灰岩的热液白云岩化,主要分布在川西和川中栖霞组颗粒灰岩或晶粒云岩中;②茅口组岩溶灰岩的热液白云岩化,主要分布在川中地区;③低能相带的灰岩的热液白云岩化,主要发育在川东地区。

3)断裂裂缝、残余溶蚀孔和白云石晶间孔是热液白云岩储层的主要储集空间,相比于原岩物性较好的储层,原始储集物性较差的储层受热液白云岩化改造后,物性改善更为明显。

参 考 文 献

- [1] Machel H G, Lonnee J. Hydrothermal dolomite—A product of poor definition and imagination[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3–4):163–171.
- [2] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11):1641–1690.
- [3] 张涛,林娟华,韩月卿,等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J]. *石油与天然气地质*, 2020,41(1):132–143.
Zhang Tao, Lin Juanhua, Han Yueqing, et al. Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020,41(1):132–143.
- [4] 陈代钊,张艳秋,周锡强,等. 塔里木盆地西缘上寒武统下丘里塔格群热液白云岩改造时限:来自古地磁的约束[J]. *石油与天然气地质*, 2020,41(1):50–58.
Chen Daizhao, Zhang Yanqiu, Zhou Xiqiang, et al. Timing of hydrothermal alteration on the Lower Qiulitag Group dolomites of the Upper Cambrian, western margin of Tarim Basin: Palaeomagnetic constraint[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020,41(1):50–58.
- [5] 唐雪松,谭秀成,刘宏,等. 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩储层特征与发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2016,37(5):731–743.
Tang Xuesong, Tan Xiucheng, Liu Hong, et al. Characteristics and development mechanism of dolomite and dolomitic quartzite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5):731–743.
- [6] 孙福宁,胡文瑄,胡忠亚,等. 断裂-层序双控机制下的热液活动及成储效应——以塔里木盆地塔河、玉北地区下奥陶统为例[J]. *石油与天然气地质*, 2020,41(3):558–575.
Sun Funing, Hu Wenxuan, Hu Zhongya, et al. Impact of hydrothermal activities on reservoir formation controlled by both faults and sequences boundaries: A case study from the Lower Ordovician in Tahe and Yubei areas, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3):558–575.
- [7] 焦存礼,何治亮,邢秀娟,等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1):277–284.
- [8] 宋光永,刘树根,黄文明,等. 川东南丁山-林滩场构造灯影组热液白云岩特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(6):706–715.
Song Guangyong, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Characteristics of hydrothermal dolomite of Upper Sinian Dengying Formation in the Dingshan-Lintanchang structural zone, Sichuan Basin, China[J]. *Journal Of Chengdu University Of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, 36(6):706–715.
- [9] 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.
- [10] 李毅,沈浩,石学文,等. 川东-川中地区茅口组白云岩成因初探及“热次盆”概念的提出. *天然气勘探与开发*[J]. 2013,36(4):1–3.
Li Yi, Shen Hao, Shi Xuewen, et al. Distribution and origin of dolomite in Maokou Formation, Eastern and Central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2013, 36(4):1–3.
- [11] 汪华,沈浩,黄东,等. 四川盆地中二叠统热水白云岩成因及其分布[J]. *天然气工业* 2014,34(9):25–32.
Wang Hua, Shen Hao, Huang Dong, et al. Origin and distribution of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014,34(9):25–32.
- [12] 黄思静,潘小强,吕杰,等. 川西栖霞组的热液白云岩化作用及其后的倒退溶解——不彻底的回头白云岩化作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013,40(3):288–300.
Huang Sijing, Pan Xiaoqiang, Lv Jie, et al. Hydrothermal dolomitization and subsequent retrograde dissolution in Qixia Formation, West Sichuan: a case study of incomplete and halfway-back dolomitization[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013,40(3):288–300.
- [13] 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.
- [14] 陈轩,赵文智,张利萍,等. 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*, 2012,33(4):562–569.
Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Zhang Liping, et al. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012,33(4):562–569.
- [15] 刘宏,马腾,谭秀成,等. 表生岩溶系统中浅埋藏构造-热液白云岩成因-以四川盆地中部中二叠统茅口组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016,43(6):916–927.

- Liu Hong, Ma Teng, Tan Xiucheng, 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): 916-927.
- [16] 刘建强, 郑浩夫, 刘波, 等. 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*, 2017, 38(4): 386-398.
- Liu Jianqiang, Zheng Haofu, Liu Bo, et al. Characteristics and genetic mechanism of the dolomite in the Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(4): 386-398.
- [17] 孟森, 周进高, 杨柳, 等. 川西地区中二叠统栖霞组中一粗晶白云岩成因[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(1): 75-83.
- Meng Sen, Zhou Jingao, Yang Liu, et al. Genesis of medium-coarse crystalline dolomite of Middle Permian Qixia Formation, western Sichuan [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(1): 75-83.
- [18] Zheng H F, Ma Y S, Chi G X, et al. Stratigraphic and Structural Control on Hydrothermal Dolomitization in the Middle Permian Carbonates, Southwestern Sichuan Basin (China) [J]. *Minerals*, 2019, 9(1): 1-27.
- [19] 陈轩, 赵文智, 刘银河, 等. 川西南地区中二叠统热液白云岩特征及勘探思路[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 460-466.
- Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Liu Yinhe, et al. Characteristics and exploration strategy of the Middle Permian hydrothermal dolomite in southwestern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 460-466.
- [20] 张文. 川西-北地区中二叠统白云岩储层成因及控制因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- Zhang Wen. The dolostone reservoirs from the Middle Permian in northwestern Sichuan Basin: Genesis and controlling factors [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [21] 宋晓波, 隆轲, 王琼仙, 等. 四川盆地西部中二叠统茅口组油气地质条件及勘探潜力[J]. *海相油气地质*, 2016, 21(1): 1-6.
- Song Xiaobo, Long Ke, Wang Qiongxiang, et al. Petroleum geology conditions and exploration potential of middle permian Maokou carbonate rock in western part of Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2016, 21(1): 1-6.
- [22] 韩晓涛, 鲍征宇, 谢淑云. 四川盆地西南中二叠统白云岩的地球化学特征及其成因[J]. *地球科学*, 2016, 41(1): 167-176.
- Han Xiaotao, Bao Zhengyu, Xie Shuyun. Origin and Geochemical Characteristics of Dolomites in the Middle Permian Formation, SW Sichuan Basin, China [J]. *Earth Science*, 2016, 41(1): 167-176.
- [23] 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.
- [24] 张坤贞, 王葵舒, 杨永灵, 等. 川东北普光地区茅口组白云岩发育特征[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(1): 20-26.
- Zhang Kunzhen, Wang Yanshu, Yang Yongling, et al. Characteristics of the dolomite in Permian Maokou Formation in Puguang Area, northeastern Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(1): 20-26.
- [25] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 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*, 2019, 39(6): 13-21.
- Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Huang Renchun, et al. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 13-21.
- [26] 曾德铭, 石新, 王兴志, 等. 川西北地区下二叠统栖霞组滩相储层特征及其分布[J]. *天然气工业*, 2010, 30(12): 25-28.
- Zeng Deming, Shi Xin, Wang Xingzhi, et al. Features and distribution of shoal facies reservoirs in the Lower Permian Qixia Formation, northwest Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(12): 25-28.
- [27] 王春梅. 川西中二叠统栖霞组白云岩形成机制及其与川东北下三叠统飞仙关组对比[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- Wang Chunmei. The formation mechanism of the dolomite of the Middle Permian Qixia Formation in Western Sichuan basin and its correlation with the Feixianguan Formation of the lower Triassic in northeastern Sichuan basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [28] 舒晓辉, 张军涛, 李国蓉, 等. 四川盆地北部栖霞组-茅口组热液白云岩特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 442-448.
- Shu Xiaohui, Zhang Juntao, Li Guorong, et al. Characteristics and genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 442-448.
- [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. Palaeogeothermal response and record of the effusing of Emei basalts in the Sichuan basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(6): 474-482.
- [30] 黄思静, 胡作维, 钟怡江, 等. 四川盆地二叠系三叠系碳酸盐岩和砂岩中的鞍形白云石岩石学、形成温度与流体[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(2): 129-148.
- Huang Sijing, Hu Zuwei, Zhong Yijiang, et al. Saddle dolomite in Permian-Triassic carbonate rocks and sandstones of Sichuan Basin: petrology, formation temperature and palaeofluids [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2015, 42(2): 129-148.
- [31] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 949-960.
- Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 949-960.
- [32] 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 等. 早成岩期喀斯特化研究新进展及

- 意义[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 441-456.
- Tan Xiucheng, Xiao Di, Chen Jingshan, et al. New advance and enlightenment of eogenetic karstification [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 441-456.
- [33] 刘宏, 马腾, 谭秀成, 等. 表生岩溶系统中浅埋藏构造-热液白云岩成因——以四川盆地中部中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 916-927.
- Liu Hong, Ma Teng, Tan Xiucheng, 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): 916-927.
- [34] 王珏博, 谷一凡, 陶艳忠, 等. 川中地区茅口组两期流体叠合控制下的白云石化模式[J]. 沉积学报, 2016, 34(2): 236-249.
- Wang Juebo, Gu Yifan, Tao Yanzhong, et al. The model of dolomitization jointly controlled by two-episode fluids in Maokou Formation in central Sichuan basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(2): 236-249.
- [35] 蒋裕强, 谷一凡, 李开鸿, 等. 四川盆地中部中二叠统热液白云岩储集空间类型及成因[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 16-24.
- Jiang Yiqiang, Gu Yifan, Li Kaihong, et al. Space types and origins of hydrothermal dolomite reservoirs in the Middle Permian strata, Central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 16-24.
- [36] Beckert J, Vandeginste V, John, Cédric M. Relationship between karstification and burial dolomitization in Permian platform carbonates (Lower Khuff - Oman) [J]. Sedimentary Geology, 2016, 342: 165-179.
- [37] 李蓉, 胡昊, 石国山, 等. 川东北阆中地区二叠系茅口组白云岩化成因[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(2): 127-132.
- Li Rong, Hu Hao, Shi Guoshan, et al. Genesis of dolomitization of Permian Maokou formation in Langzhong area, northeastern Sichuan basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(2): 127-132.
- [38] Smith J L B. Origin and reservoir characteristics of Upper Ordovician Trenton-Black River hydrothermal dolomite reservoirs in New York [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1691-1718.
- [39] 黎霆, 诸丹诚, 杨明磊, 等. 热液活动对四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩的影响[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 639-651.
- Li Ting, Zhu Dancheng, Yang Minglei, et al. Influence of hydrothermal activity on the Maokou Formation dolostone in the central and western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 639-651.
- [40] Lavoie D, Chi G, Brennan-Alpert P, et al. Hydrothermal dolomitization in the Lower Ordovician Romaine Formation of the Anticosti Basin: Significance for hydrocarbon exploration [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2005, 53(4): 454-471.
- [41] 陈代钊. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 614-622.
- Chen Daizhao. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 614-622.
- [42] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 194-202.
- He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan Large Igneous Province: new evidence from stratigraphic records [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 194-202.
- [43] 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(2): 89-96.
- He Bin, Xu Yigang, Wang Yamei, et al. Nature of the Dongwu Movement and its temporal and spatial evolution [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(2): 89-96.
- [44] He B, Xu Y G, Chung S L, et al. Sedimentary Evidence for a Rapid, Kilometer-scale Crustal Doming Prior to the Eruption of the Emeishan Flood Basalts [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213(3): 391-405.
- [45] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235(1): 7-63.
- [46] Shields M J, Brady P V. Mass balance and fluid flow constraints on regional-scale dolomitization, Late Devonian, Western Canada Sedimentary Basin [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1995, 43(4): 371-392.
- [47] 厚东琳. 白云石化对储层发育的控制作用——以普光、元坝气田飞仙关组为例[J]. 断块油气田, 2019, 26(4): 449-452.
- Hou Donglin. Control effect of dolomitization on reservoir development: taking Feixianguan Formation in Puguang and Yanba gas fields for example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(04): 449-452.
- [48] 杨天博, 何治亮, 金振奎, 等. 川西北中二叠统超深层白云岩储层孔隙结构及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 116-131.
- Yang Tianbo, He Zhiliang, Jin Zhenkui, et al. Pore structure and controlling factors of the ultra-deep Middle Permian dolomite reservoirs, northwestern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 116-131.

(编辑 张亚雄)