

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

张涛¹, 林娟华¹, 韩月卿¹, 王泽宇², 秦军³, 张荣强¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 519000;
3. 中国石化江汉油田分公司, 湖北 武汉 430223)

摘要:针对四川盆地东部中二叠统茅口组异常白云岩分布,利用岩心岩石学特征描述、地化测试、地震和测井资料综合解释等方法,分析了热液白云岩化作用的识别标志和发育时间,探讨了其成因模式及对储层改造。研究表明:不规则白云岩分布、中-粗晶基质白云岩、早期张性裂缝和溶洞中以充填鞍形白云石和石英-鞍形白云石为主要识别标志,白云石流体包裹体均一温度(115~145℃)高于地层温度,偏负的氧同位素值[$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)为-5.4‰~-7.1‰],高锶同位素比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.707 947~0.708 458),是识别热液的主要地化指标。热液白云岩化作用主要发生在张性或扭张性断裂系统附近,其成层性受原始沉积相控制,在断裂破碎带附近灰岩地层也被热液改造。热液改造主要时期是在茅口组经历浅埋藏、抬升暴露岩溶作用和吴家坪组沉积之后的晚二叠世-中三叠世。峨眉山玄武岩喷发为热液提供了热源,断裂、沉积相和热液侵入时间等因素在时间和空间上组合,造就了热液白云岩形成的条件和不同的分布形式。热液白云岩化作用对储层的改造具有复杂性,低渗透性灰岩层热液云化后新增孔隙空间不明显,具有初始空隙的高能流体受热液云化适度改造后可能存在一定孔渗性。

关键词:热液白云岩化;识别标志;储层改造;茅口组;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein

Zhang Tao¹, Lin Juanhua¹, Han Yueqing¹, Wang Zeyu², Qin Jun³, Zhang Rongqiang¹

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 519000, China; 3. Jiangnan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: Based on the distribution of abnormal dolomites in the Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, we analyzed the identification markers and timing of hydrothermal dolomitization (HTD), and discussed its genetic model and reservoir modification by means of petrological description of cores, geochemical testing, as well as comprehensive interpretation of seismic and logging data. The results indicate that the main identification markers include irregular dolomite distribution, medium-to-coarse crystalline matrix dolomite, saddle dolomite and quartz-saddle dolomite in the earlier tensile fractures and cavens. The homogenization temperature of dolomite fluid inclusions (115–145℃) being higher than the host formations, more negative oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) -5.4‰–7.1‰), and increased strontium isotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.707 947–0.708 458) are the main geochemical indicators of hydrothermal activities. HTD mainly occurred near tensional or transtensional fault systems, and its stratification is controlled by original sedimentary facies. The limestone formations near the fracture/fault zones were also altered by hydrothermal fluids. The main stage of HTD alteration is the Late Permian-Middle Triassic after the shallower burial and karstification via uplifting and explosion of the Maokou Formation and the deposition of the Wujiaping Formation. The eruption of Emei basalt served as heat source for hydrothermal fluids, and the factors such as faults, sedimentary facies and the intrusion of hydrothermal fluids

收稿日期:2019-10-12;修订日期:2019-11-26。

第一作者简介:张涛(1973—),男,博士、高级工程师,碳酸盐岩沉积与储层评价。E-mail:zhangtao1973.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1663209);中国科学院A类战略性先导项目(XDA14010201)。

are coupled in time and space, resulting in the development and various distribution patterns of hydrothermal dolomites. The effect of HTD on reservoir modification is complex. The newly-generated pore space is not remarkable in lower-permeability limestones under HTD, while the high-energy beach facies with initial pores may preserve certain porosity and permeability under HTD.

Key words: hydrothermal dolomitization (HTD), identification marker, reservoir modification, Maokou Formation, Sichuan Basin

近十多年来四川盆地西部(川西)、中部地区多口钻井在中二叠统栖霞组和茅口组钻遇优质白云岩储层,部分钻井获得高产气流,如双探1井、龙004井和南充1井等。川东地区泰来6井也在茅口组白云岩领域勘探取得突破,邻区卧龙河气田卧67井目前累产气超过 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$,近期岩性复查为白云岩储层,显示出茅口组白云岩领域具有较大的勘探潜力。但在白云岩成因类型方面,依然存在诸多不同的观点,何幼斌等指出热液白云岩是埋藏白云化作用产物^[1],局部存在高温条件或特殊热事件的影响;王运生等认为下二叠统的白云岩为埋藏热液和混合水成因^[2];蒋志斌等将川西下二叠统白云岩的成因归纳为混合水和埋藏白云化作用^[3];黄思静等对四川盆地西部的中二叠统栖霞组白云岩岩石学进行研究,认为成因与热液有关^[4];近五年来,热液成因占主导地位,如陈轩(2012)、杨光(2015)等认为断裂沟通和有利沉积相带是热液白云化作用发生的主要因素^[5-8],并预测出白云岩的分布(图1a)。但在茅口组热液白云岩形成时间和形成要素的匹配与分布特征之间的关系及对储层的控制方面研究不够,从而影响热液白云岩的评价和预测。本文利用四川盆地东部(图1a)三年来新钻井资料和测试分析结果在热液白云岩识别、形成时间、发育模式及对储层改造等方面做进一步探讨。

1 热液白云岩识别

热液白云岩本质上是指由比围岩温度高的热流体形成(交代或沉淀)的白云石组成的白云岩^[9],其形成反映了地热异常地质背景下的一种地质事件作用的产物。其成因需要有热源、流体运移驱动机制、运移通道(断裂、裂缝带和渗透层)、交代或沉淀作用场所以及相应的封盖体系等多种条件在时间和空间的匹配。因此热液白云岩与一般准同生白云岩在形成环境差异较大的情况下必然表现出不一样的特征,其识别也是从岩性分布、矿物学特征和地化特征等多方面的差异开展。

1.1 白云岩分布不具地层意义

从区域上,中二叠统茅口组主要沉积了一套扬子地

台稳定克拉通内浅海碳酸盐岩地层,岩性主要为深灰色厚层泥晶生物灰岩、浅灰色泥粉晶灰岩、亮晶生屑灰岩,含燧石结核或硅质岩薄层,区域上分布广,厚度相对稳定。在泰来6井茅三段下部主要以灰-深灰色灰岩为主、夹薄层含泥灰岩,中部发育块状深灰色白云岩与薄层硅质白云岩、硅质岩互层,上部为灰色灰岩(图1b),其中5485.5~5511 m深度段为细-中晶白云岩、残余生屑白云岩夹薄层灰质白云岩,厚度为25.5 m。而邻区的泰来2井对应层段就不发育白云岩,永兴1井在茅三段发育3 m厚深度白云岩,焦石1井茅口组不发育白云岩(图2),显示茅口组白云岩分布局限,呈现透镜状产出的特征。泰来6井区位于北西-南东向基地断裂带附近,在该断裂带附近的部分钻井(卧93井、卧85井、卧67井、卧117井、卧123井、南充1井、池4井、永兴1井和广参2井等)在茅三段发育白云岩,泰来2井、金鸡1井、福石1井、枫1井和建深1井等距北西-南东向断层较远的钻井就不发育热液白云岩,所以热液白云岩整体分布上呈现较强的非均质性,不具备地层学意义。四川盆地中二叠统栖霞组和茅口组沉积期为开阔台地沉积环境,没有发现蒸发潮坪相和沉积暴露^[10],另外在全球早-中二叠世处于冰期的大背景下,不具备发育准同生期白云岩的条件^[11],说明其不是准同生期环境下的产物。

1.2 岩石学特征

一般准同生成因白云岩晶体为粉-泥晶,晶体大小为 $2 \sim 10 \mu\text{m}$,经埋藏重结晶后晶体变大到 $30 \sim 50 \mu\text{m}$,而经过热液改造的白云岩晶体可达 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ 。如泰来6井深度5491 m为细晶白云岩,雾心亮边,见颗粒幻影,深度5489.91 m细-中晶白云岩,见生屑幻影(图3a,b),华蓥山二崖剖面茅口组白云岩为中-粗晶,晶粒直径可达 $200 \sim 250 \mu\text{m}$,具有雾心亮边结构,永兴1井茅口组为含硅质粉细晶白云岩(图3d-f)。泰来6井深度5511.5 m溶蚀缝洞中充填鞍形白云石晶体直径达到 $300 \sim 600 \mu\text{m}$ (图3c),鞍形白云石在茅口组的溶蚀缝洞中普遍出现,是一种乳白色、灰色的亮晶白云石晶体,具有独特弯曲晶面,波状消光,通常作为铸模孔、晶洞和裂缝内的胶结物存在。鞍形白云石可以作为热液

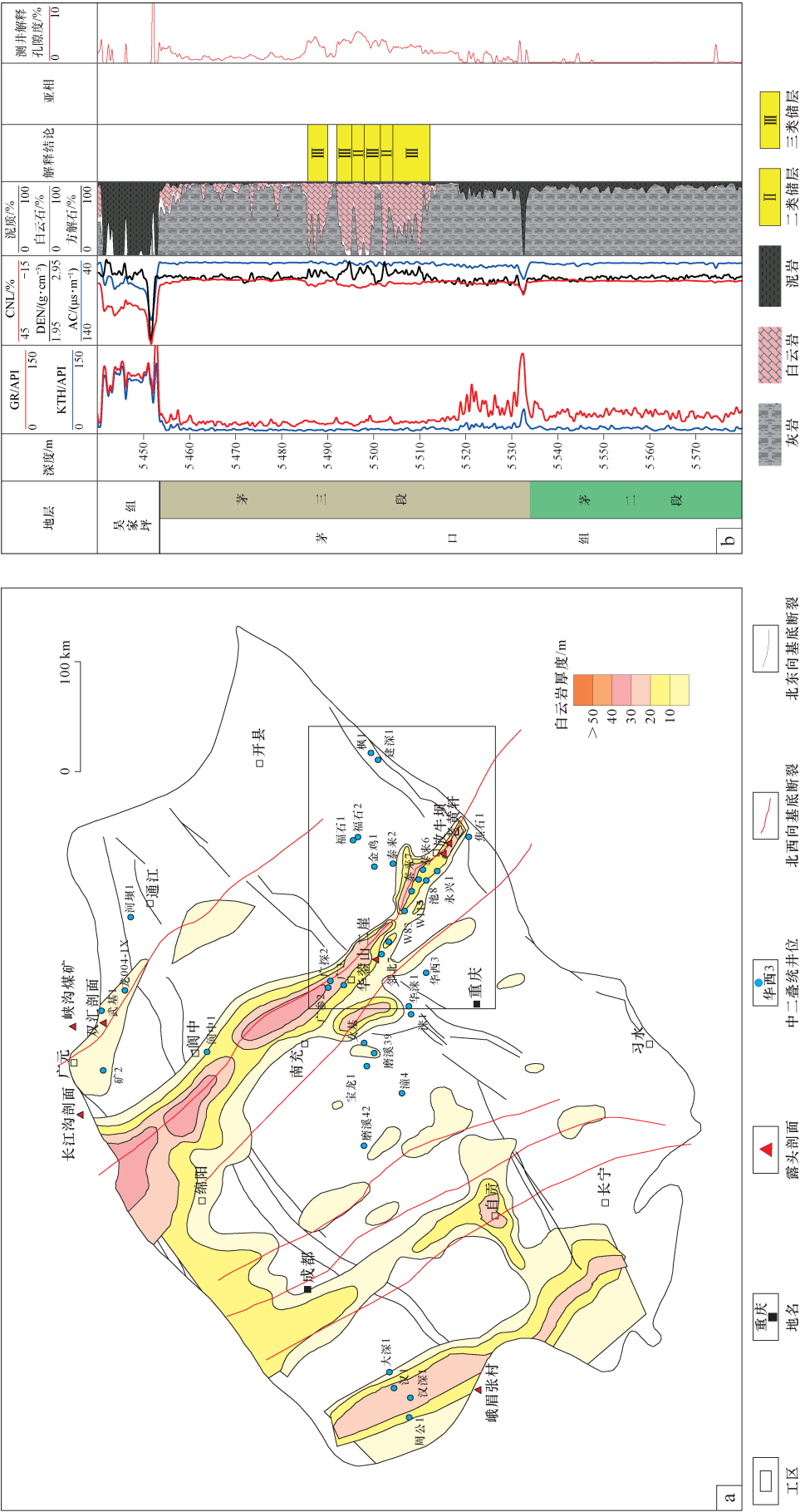


图1 四川盆地中二叠统茅口组白云岩和断裂分布 (据文献[7]修改) 工区位置 (a) 及泰来6井茅口组岩性综合柱状图 (b)

Fig.1 A map showing the distribution of the Maokou Formation dolomites, faults (modified after reference [7]) in the study area (a), and the lithologic column of the Maokou Formation in Well Tailai 6 (b) in Sichuan Basin

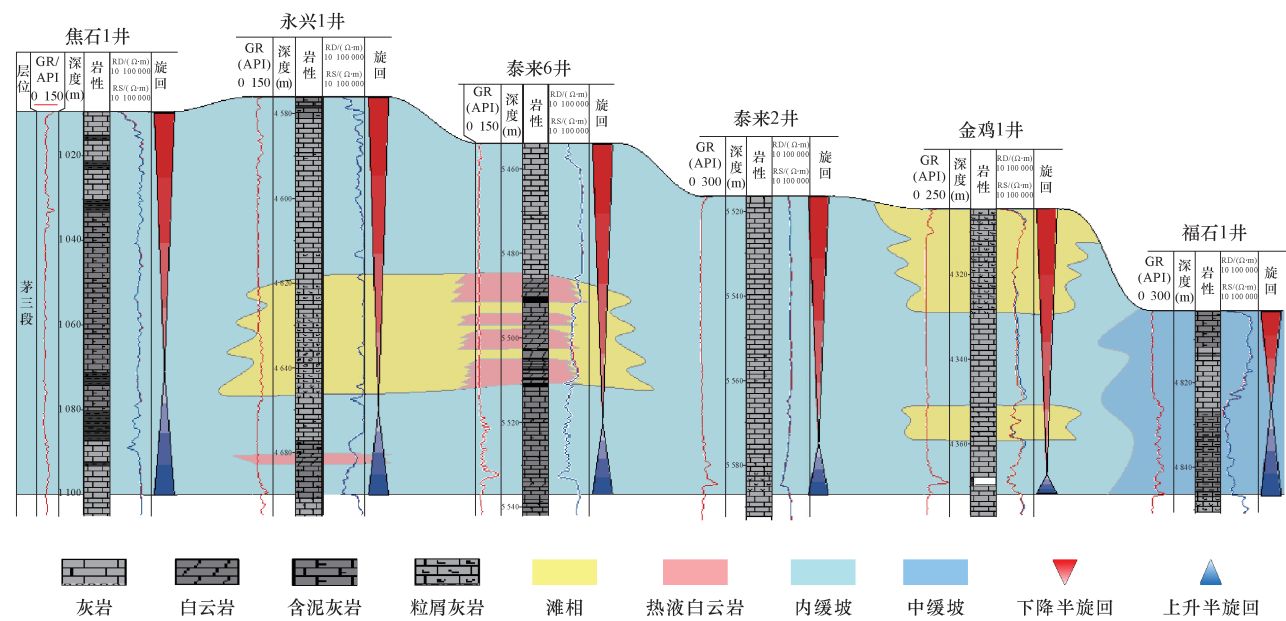


图 2 四川盆地焦石 1 井—福石 1 井中二叠统茅三段连井剖面
Fig. 2 Correlation of the Mao 3 member between Well Jiaoshi 1 and Well Fushi 1 in the Sichuan Basin

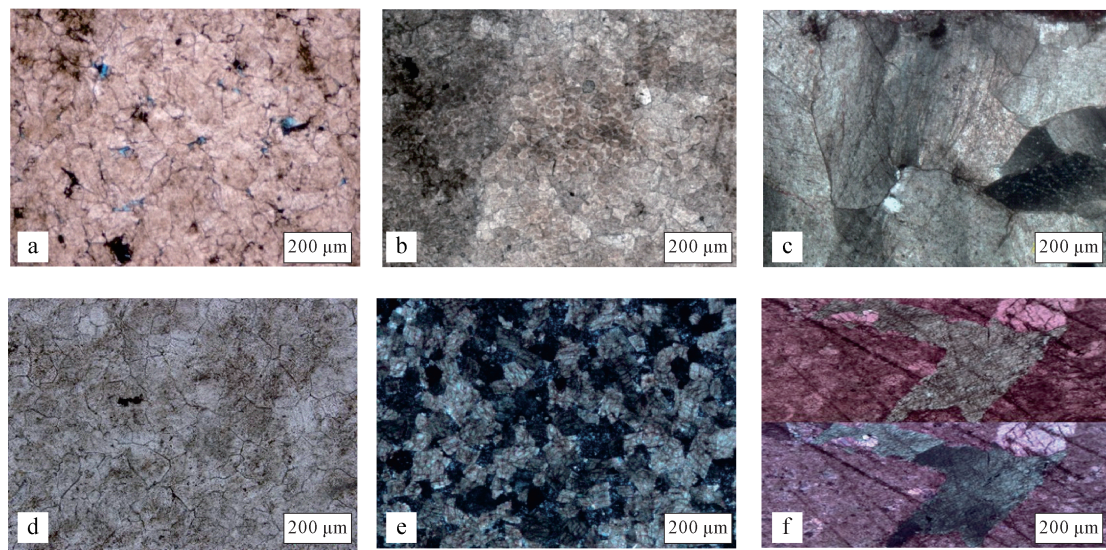


图 3 川东地区中二叠统茅三段热液白云岩特征
Fig. 3 Characteristics of hydrothermal dolomites in the Mao 3 member, eastern Sichuan Basin

a. 泰来 6 井,埋深 5 491.00 m,细晶白云岩,见晶间孔,面孔率 0.5%;b 泰来 6 井,埋深 5 489.91 m,细—中晶白云岩,见生屑幻影;b. 泰来 6 井,埋深 5 511.50 m 溶蚀缝洞中充填鞍形白云石;d. 华蓥山二崖剖面,茅口组,中—粗晶白云岩,具有雾心亮边结构;e. 永兴 1 井,埋深 4 661.00 m,含硅质白云岩;f. 永兴 1 井,埋深 4 700.00 m,泥晶灰岩中裂缝充填白云石,偏光—正交照片

成因的识别标志^[12-13],但并不是鉴别热液成因背景的唯一标志,也不是所有热液背景中都有鞍形白云石^[14],因此需要结合鞍形白云石的产状、含量、共生矿物组合及地质背景综合判识其成因。

沉积相类型和热液云化作用之前灰岩所经历的成岩作用在控制热液的流动、白云岩结构类型和孔隙类型等具有重要作用,从川东茅口组白云岩结构类型方面整体上热液白云石有 3 种表现形式。

1) 高能颗粒滩整体热液改造成白云岩。表现为白云岩呈层状分布,溶蚀孔洞充填白色粗晶白云石,主要成因是热液流体通过该类高渗透性颗粒灰岩层是可以充分发生交代作用(微溶蚀—微沉淀),较大的溶蚀孔洞可以在稍晚期充填鞍形白云石(图 4a—c)。薄片上细—中晶白云岩,见生屑幻影(图 3a,d),局部由于重结晶严重,主要是早期具有渗透性砂屑灰岩被热液云化改造而成,该类型以中晶白云岩为主,半自形,少量

自形,具有雾心亮边结构,含生物,多为碎片和残余结构,镜下常为生物幻影,见少量海百合个体。

2) 具有渗透性的低能粉屑灰岩被热液改造成粉细晶白云岩。常见张性裂缝充填粗晶白云石和溶蚀孔隙,一般是在未致密化前具有低渗特征且靠近裂缝情况下的热液改造,需要热液白云岩化作用发生时间较早,岩性上表现出均质基质白云岩被裂缝切割呈不规则状(图4c,d)。永兴1井茅口组钻遇15 m埋深4 655~4 670 m)热液作用发育段,岩性为白云岩与灰色含硅质灰岩呈互层状产出。

3) 致密泥晶灰岩中裂缝内充填鞍形白云石。主要是呈胶结物形式存在(图4e),永兴1井茅口组取心段位于白云岩发育段下部,深灰色泥晶灰岩裂缝中充填乳白色的白云石,微裂缝为热液运移通道,由于基质灰岩已经致密,热液流体无法对灰岩进行云化改造,薄片上显示含有孔虫泥晶灰岩,裂缝中充填有波状消光特征的鞍形白云石(图3f)。

从岩心可以看到热液白云岩化存在一定的共生次序,首先是基质白云岩化作用,石灰岩溶解伴随基质白云岩化形成印模,如图3f泰来6井深度5 489.91 m细-中晶白云岩,见生屑幻影,也可能形成溶解垮塌角砾岩;其次是角砾岩化作用,主要在靠近断层附近,在水力破裂作用下形成棱角状,互不接触,属机械破裂,最后是鞍形白云石胶结,角砾间、溶蚀孔洞间充填白色粗

晶白云石、石英、萤石和沥青等,部分残余孔隙中可见晚期方解石充填。

1.3 流体包裹体方面的证据

包裹体均一温度和埋藏史相结合是判识热液的主要方法^[13],再结合确定的热液发生时间,这3个因素综合分析是确定热液白云岩化作用的必要手段,本节先阐述流体包裹体的特征及其作为识别热液白云岩的证据。前人研究认为茅口组热液白云岩化作用发生与峨眉地裂运动相关,发生在晚二叠世一中三叠世^[5-6],泰来6井茅三段细晶白云岩、中粗晶白云石和鞍形白云石包体温度测试结果标明白云石均一温度区间在115~145℃(图5),裂缝充填石英温度相对于白云石偏高,硅质白云岩一般呈条带状、团块状存在于基质白云岩中,推测硅质白云岩稍晚于白云岩。根据泰来6井埋藏史(图6),晚二叠世一中三叠世茅口组处于浅埋藏阶段,埋深在1 800~2 500 m,围岩温度在60~90℃,实测白云石均一温度为115~145℃,高于同期的围岩地层温度,证明为典型的热液成因,只是外来流体的温度不太高。广参2井恢复的最大古埋深为6 793 m,对应最大古地温为200℃,流体包裹体均一温度为180~220℃^[15],在没有给出热液白云岩发生时间的情况下,说明热液作用对白云石的形成有一定影响。因此HTD定年与识别是互为因果的关系,埋藏

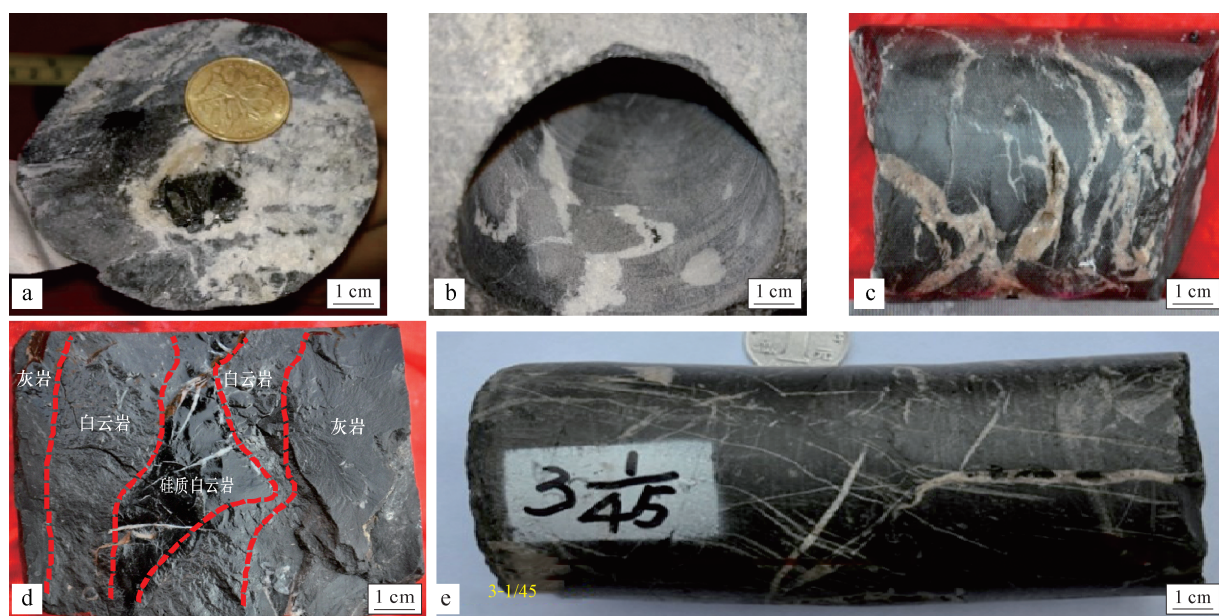


图4 四川盆地中二叠统茅三段热液白云岩特征

Fig. 4 Characteristics of hydrothermal dolomites in the Mao 3 member, Sichuan Basin

a, b. 泰来6井,埋深5 510.60 m,灰色云岩,白云石脉发育,脉宽1~3mm,白云石先充填,沥青后充填;c. 泰来6井,埋深5 510.20 m,热液破裂形成的缝洞,充填白色马鞍状白云石;d. 泰来6井,埋深5 511.40 m,深灰色硅质泥晶白云岩;e. 永兴1井,4 699.50 m,深灰色泥晶灰岩裂缝中充填有波状消光特征的白云石,微裂缝亦为热液运移通道

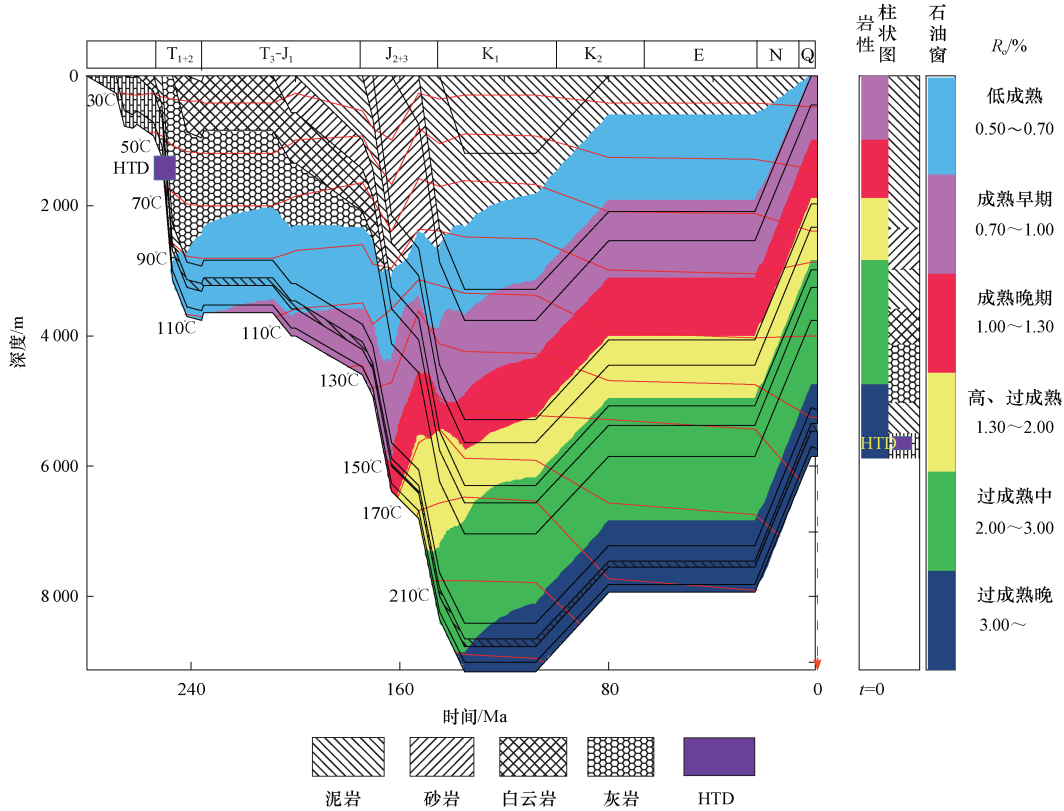


图 5 四川盆地泰来 6 井埋藏史与热史曲线

Fig. 5 Burial and thermal history curves of Well Tailai 6, Sichuan Basin

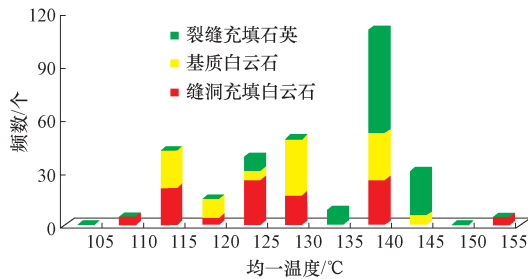


图 6 四川盆地泰来 6 井包裹体均一温度统计

Fig. 6 Homogenization temperature histogram of inclusions in Well Tailai 6, Sichuan Basin

史曲线的分析、包裹体测温及 HTD 综合定年是关键。缝洞充填鞍型白云石的均一温度与基质白云石包体均一温度分布类似,说明是同一期多阶段热液流体对基质和胶结物作用的结果。

1.4 同位素特征

碳稳定同位素的变化与温度关系不大,主要取决于生物分馏作用、水中碳稳定同位素成分、从植物或土壤中获得 CO_2 的可能性。海水成岩环境产物的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 值在 $0 \sim 4\text{‰}$; 对于氧同位素来讲,由于热分馏效应,温度升高会导致碳酸盐岩沉淀物的 $\delta^{18}\text{O}$ 更偏负。泰来 6 井取样测试了 17 个样品, $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 值

在 $2.9\text{‰} \sim 3.9\text{‰}$, 平均 3.32‰ 。白云石和灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 值为 $-5.5\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$, 平均为 -6.42‰ , 整体偏负 (图 7), 灰岩样品的氧同位素也偏负, 且与碳同位素无协变规律, 排除岩溶大气淡水溶蚀作用的影响, 说明灰岩可能受到后期高温的改造。孔洞和裂缝中充填的白云石 (主体为鞍状白云石) 及脉体周围的基质白云岩氧同位素偏负, 两者偏负幅度不一样, 基质白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 值为 $-6.9\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$, 平均为 -7.17‰ , 缝洞充填白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 值为 $-5.4\text{‰} \sim -7.1\text{‰}$, 平均为 -6.21‰ , 说明热液流体首先对具有孔渗性基质灰岩进行溶蚀和云化改造, 然

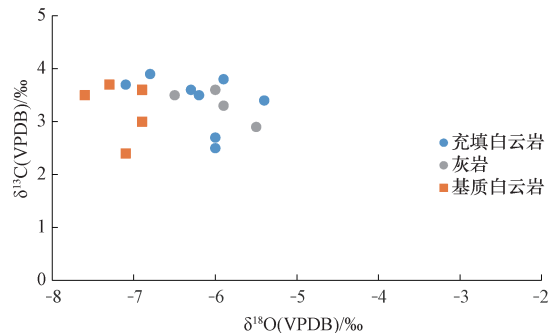


图 7 四川盆地泰来 6 井碳、氧同位素特征

Fig. 7 Carbon and oxygen isotopic features from Well Tailai 6, Sichuan Basin

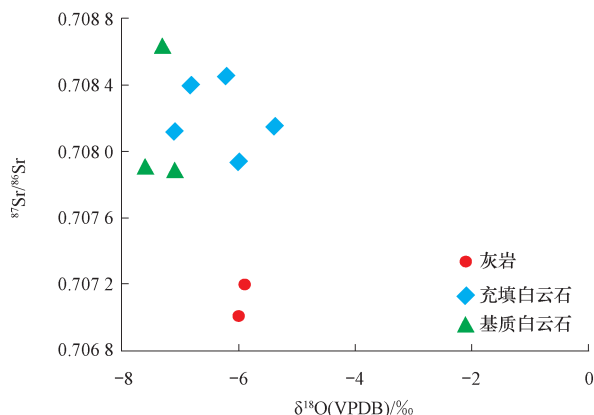


图8 四川盆地泰来6井热液白云岩及其围岩锶同位素组成特征

Fig. 8 Isotopic composition features of strontium in hydrothermal dolomites and host rocks from Well Tailai 6, Sichuan Basin

后发生在溶蚀孔洞缝内鞍形白云石的胶结充填。

泰来6井10个样品锶同位素比值 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.707 203~0.708 640,平均为0.707 980,其中两个灰岩样品平均值为0.707 100,3个基质白云岩的平均值为0.708 160,5个缝洞充填鞍形白云石的锶同位素值为0.707 947~0.708 458,平均值为0.708 220(图8)。灰岩样品的锶同位素比值与二叠纪海水的锶同位素比值范围0.706 620~0.707 740一致^[16],说明灰岩没有受到外来因素的影响。孔洞缝充填白云石与基质白云石的锶同位素比值均高于二叠纪海水的锶同位素比值,说明孔洞缝中鞍状白云石和基质白云石中的锶受外源深部流体带来的锶的影响,或者部分来自海水与茅口组下部沉积层系流体的混合,而不是幔源流体。锶同位素比值高于二叠纪海水的锶同位素比值范围,说明该地区的热液受下伏多套碎屑岩(硅铝质岩)的影响较大,另一方面,受质量效应的制约,在白云岩化过程中,质量偏轻的 ^{86}Sr 更易迁出,从而造成 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值相对增大^[17],这个增加幅度不大。孔洞缝中鞍状白云石和基质白云石中的锶同位素比值无明显差异,说明白云岩化作用受相同性质流体的控制。

2 热液白云岩形成时间

流体来源、构造背景以及储集体的演化等特征是确定热液进入碳酸盐岩主体时间的关键指标。本文认为通过地质背景、地震资料、地质事件及成岩序列等方面多信息综合判断热液形成时间。

1)从区域构造、沉积相与地层对比分析结果看,

开江-梁平古裂陷在茅口组沉积期末开始发育,在吴家坪组沉积期和大隆组继续发育扩大,为一继承性古裂陷槽^[18]。河坝1井地球化学结果揭示,拉张裂陷起始于茅口组末期,吴家坪期达到拉张高峰,大隆组继续拉张作用,元素测井数据显示吴家坪组合大隆组沉积期均有热液输入(图9)。平面分布上看,古裂陷东南缘裂陷起始时间晚,为吴家坪组沉积期,茅口组侵蚀严重,岩溶现象明显,如金鸡1井,茅口组顶部风化剥蚀程度较强,发育大量的岩溶角砾和孔洞。

2)从过广参2井(茅三段4 593~4 615 m深度段发育热液白云岩)的地震剖面看^[5],二叠纪古断裂断裂发源于基底,消失于上二叠统,张扭性断裂,断层断距不明显,断层带宽度一般在1~2 km(图10);靠近二叠纪古断裂带的阆中1井在吴家坪,发育粗晶白云岩,显示出波状消光的马鞍状晶形,较低的氧同位素值均表明其为热液成因。因此从断裂切割的地层以及断裂附近热液白云岩发育的层位推测,二叠纪古断裂活动的年代不晚于二叠纪末,部分地区可能是早期断裂的再次活化。

3)辉长岩体锆石U-Pb年龄为258~262 Ma^[19],峨眉山玄武岩主喷发期257~250 Ma^[20],因此活动相关的岩浆侵入滞后于玄武岩主喷发期,但不晚于250 Ma;该时期岩浆侵入和喷发提供了地热场,古热流值在距今259 Ma达到最高峰,持续到240 Ma时在川东地区已恢复正常^[21],即在中三叠世早期热液对白云岩化作用的影响已结束。

4)从成岩序列上看,涪陵老黄轩剖面:茅口组中、早期溶洞中充填物云化,而周缘为斑状云岩或者灰岩,说明白云岩化作用时间晚于表生岩溶系统充填物形成之后。

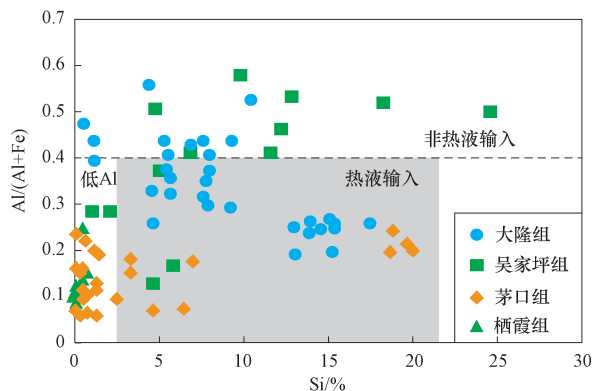


图9 四川盆地河坝1井元素测井交会图

Fig. 9 The crossplot of element logging in Well Heba 1, Sichuan Basin

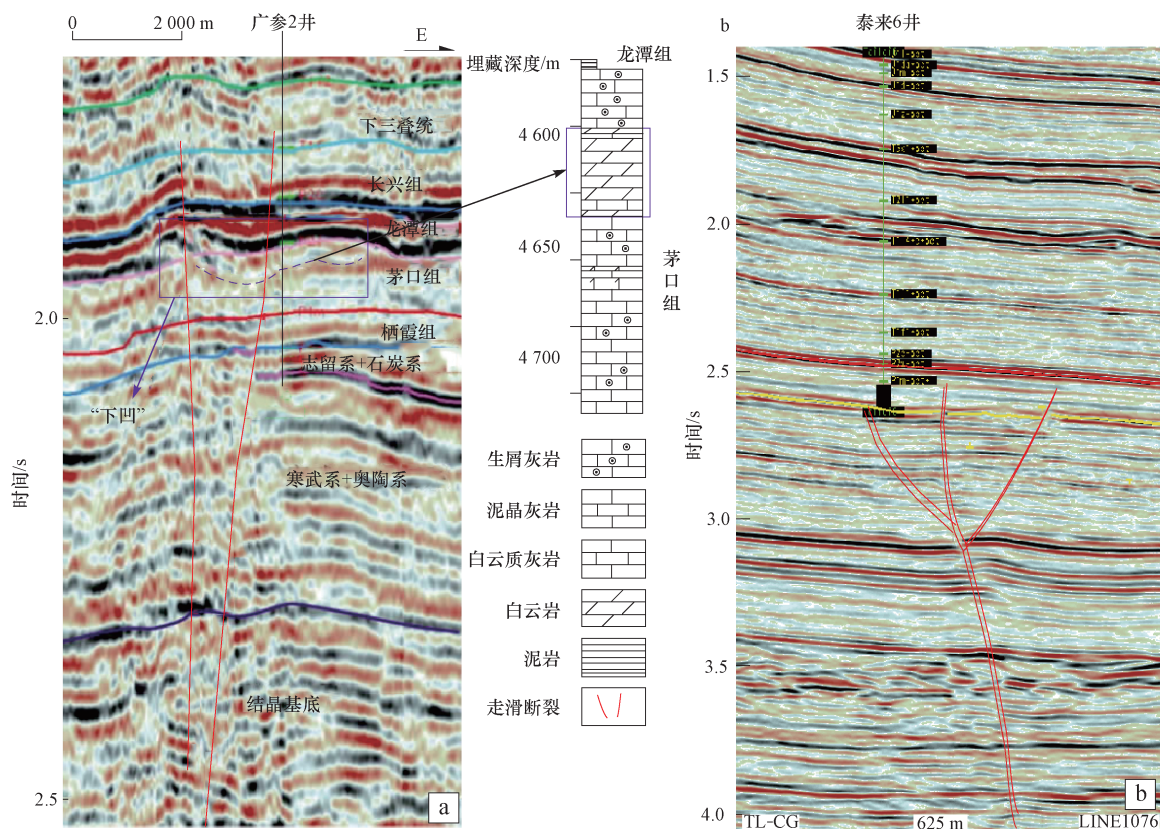


图10 四川盆地过井地震剖面断裂解释

Fig. 10 Fault interpretation on well-tied seismic profile, Sichuan Basin

a. 过广参2井地震剖面, 断层终止于上二叠统^[5]; b. 过泰来6井负花状构造

5) 泰来6井岩心为灰色云岩, 白云石脉发育, 脉宽1~3 mm, 白云石先充填, 沥青后充填; 旺苍正源, 二叠系茅口组灰岩被热液所改造, 形成粗晶白云岩, 孔洞中依次充填白云石、沥青和方解石, 说明云化时间早于第一期液态充填(图3b)。从热史曲线上看, 茅一段晚二叠世末到早三叠世处于低成熟阶段, 到中三叠世开始进入成熟阶段^[22]。

通过上述分析, 川东地区茅口组热液白云岩化作用发生在茅口组经历浅埋藏、抬升暴露、吴家坪组沉积和油气充填之后, 即早-中三叠世, 峨眉山玄武岩喷发持续提供了热源, 该期处于拉张背景, 断裂提供了流体运移通道, 且沟通具有初始孔渗性的滩体, 这几个因素在时间和空间上组合, 形成了热液白云岩形成的条件, 也限制了热液白云岩化作用的范围。

3 热液白云岩发育控制因素与发育模式

G. R. Davies (2006) 统计了世界上大量的热液白云岩实例, 约80%热液白云岩作用发生在早期、浅埋藏阶段, 基质白云石与鞍形白云石基本上是同时期的产物^[11]。其机理为热液上升导致裂隙带内流体压力

聚集, 大于围岩孔隙流体压力, 通过水力破裂作用而导致断层的扩展, 上升的大部分热液在顶部受阻情况下在断层附近及渗透层内中渗流、聚集和循环, 与早期浅埋藏阶段具有渗透性的灰岩发生白云岩化作用, 形成具有一定规模的基质白云岩改造体。在峨眉玄武岩活动期提供热源的背景下, 茅口组具有层状的白云岩段必须具备两个条件, 靠近断裂带和滩体发育。

1) 基底断裂沟通是热液白云岩作用的必要条件。从F15基底断裂带附近钻井统计看, 广参2井、福石1井、卧龙93井、卧龙85井、卧龙123井、泰来6井、泰来601井和泰来7井均发育层状白云岩, 并且钻遇白云岩的井区地震剖面上均揭示有断层发育。白云岩发育层段对比表明, 断裂带附近的钻井白云岩厚度较大, 远离断裂的钻井白云岩厚度减小, 如永兴1井白云岩厚度为5 m, 再远则无白云岩, 如泰来2井和金鸡1井。可以通过精细地震断层解释及裂缝带预测的方法来估计热液白云岩发育区。全盆茅口组白云岩主要沿断裂分布, 有热液白云岩附近必有断裂, 有滩相的部位不一定有热液白云岩, 福石2井和金鸡1井茅三段上部发育生屑灰岩段未被热液改造成白云岩, 主要原因是无断裂沟通(图1a)。

2) 颗粒滩是层控型热液白云岩储层形成的物质基

础,茅口组沉积时期,颗粒滩发育,准同生期地貌高部位水动力强,形成颗粒滩相沉积,由于海平面频繁升降,高部位滩体暴露遭受大气淡水溶蚀,初始孔渗性好。至浅埋藏时期,颗粒滩粗结构固结成岩后仍残余粒间孔,具有一定孔渗性,在裂缝沟通的情况下,有利于热液进入,尚存的基质孔隙为流体充分交换提供空间,原始的灰岩发生白云岩化。泰来6井白云岩发育段在垂向上构成多个低能泥粒结构的致密层(灰岩)和高能滩相高孔层(白云岩)多旋回叠置的特点。泰来2井茅三段处于内缓坡下部沉积环境(图2),枫1井位于中缓坡环境,无滩相发育,更没有遭受暴露溶蚀,初始孔隙不发育,在热液活动期没有受到热液云化作用的改造。相对低能沉积环境不利于热液改造,以豹斑状白云岩为主,岩性致密。

综上所述,中二叠世晚期至晚二叠世初期,为峨眉山裂运动的高峰期,此时张性断裂活动表现最强,同时伴随着大范围峨眉山玄武岩的喷发,古热流值达到最

高峰^[21]。被升温的地下热液流体沿着张(扭)性断裂体系进入经过多套地层到中二叠统栖霞组与茅口组,甚至到吴家坪组中。由于地层内部茅口组泥灰岩与吴家坪组部分泥灰岩及泥云岩的封堵,热液流体的运移被减缓,在有一定孔渗性(颗粒滩和岩溶体系或二者复合体)的地层中发生侧向运移和充分的白云岩化作用,从而促使具有初始孔渗性的滩相灰岩变成白云岩,厚度可达30 m,取决于具有孔渗性滩相的厚度;靠近断裂带及裂缝网络发育区的部位热液云化改造强烈,而已致密的泥晶灰岩未被云化,只是在裂缝中充填鞍形白云石,远离断层的地区则无影响。断裂带则出现断层角砾间充填鞍形白云石,角砾仍为灰岩(图11)。整体上茅口组热液白云岩主要沿北西-南东向基底断裂分布(图1)。热液溶蚀作用也同时发生,产生溶蚀孔洞并伴随鞍形白云石、石英和晚期方解石的充填,基质白云石和孔洞缝充填白云石是同一热液流体形成的产物,形成时间也基本一致。

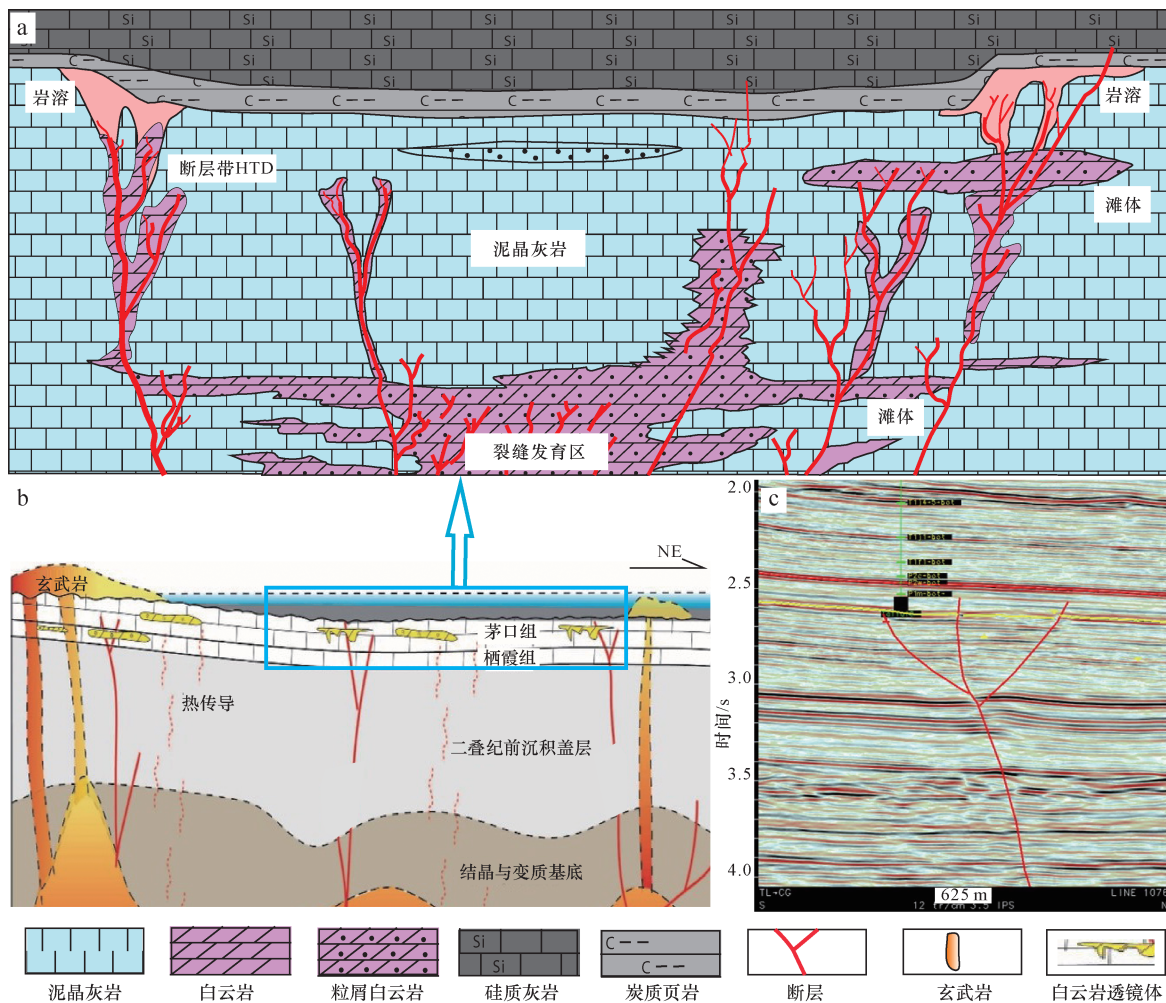


图11 四川盆地中二叠统茅口组热液白云岩作用模式

Fig. 11 HTD model of the Middle Permian Maokou Formation, Sichuan Basin

a. 茅口组热液白云岩主要分布于有断层沟通的滩体及断裂带; b. 四川盆地玄武岩及断裂分布; c. 过泰来6井剖面断层解释

4 热液白云岩化作用对储层改造

白云岩与灰岩比较而言,具有较高的抗压性能和脆性,对于孔隙保持和同等应力条件下产生裂缝方面好于灰岩。热液白云岩化作用对储层改造主要体现在该作用过程中是孔隙增加还是孔隙减少,这与热液白云岩化作用的机理、过程、控制因素和发育模式改造程度密切相关。

热液白云岩化作用本质上是外来热流体通过断层、裂缝网络和渗透层对原有灰岩的交代、重结晶和胶结作用过程,热液流体中富含 H_2S 和 CO_2 等酸性气体,对碳酸盐岩产生溶蚀,表现为非选择性溶蚀,形成溶孔、小型溶洞及溶蚀扩大缝。热液白云岩化作用增加孔隙主要有三种情况;①原有孔隙进一步溶蚀扩大;②重结晶后多余 Ca 和 Na 等杂质被带走产生晶间微孔^[23];③重结晶后晶体结构逐渐接近理想状态,单位晶胞体积减少而形成孔隙^[24]。茅口组热液云化改造主要产生溶孔、晶间孔、溶洞和扩溶缝储集空间类型,早期裂缝绝大多数被热液矿物充填(图12),如泰来6井深度5491.89 m 泥晶灰岩内裂缝充填白云石和方解石,后期又发生破裂,缝率约4%;丰都放牛坝,中细晶云岩,溶缝充填石英和方解石。热液白云岩化作用减少孔隙主要是胶结作用和过度云化改造,过度云化作用实际上是指云化热液流体在渗透层内持续较长时间循环,为白云石晶体生长提供物质来源,晶体变粗,孔隙减少,最后呈嵌晶状接触(图3d)。因此储层的发育与否主要取决于先期孔隙发育状况和热液白云岩化作用程度,可分为3种情况。

4.1 与裂缝网络沟通的低渗透性灰岩层热液云化后新增孔隙空间不明显

中二叠统基质灰岩通常由泥晶灰岩构成,在经历浅埋藏期的压实和胶结作用,基质孔几乎消失殆尽,形成相对致密层,后期无热液改造。早期原岩为低渗透粉屑灰岩,通过裂缝沟通后热液云化后未产生有效孔隙,仅存少量晶间孔隙(图12a—c),裂缝多数被鞍形白云石充填(图12d)。

4.2 具有初始空隙的高能滩体热液云化改造后可能存在一定孔渗性

具有初始空隙的高能滩相砂屑—生屑灰岩经热液云化改造后仍可保留一部分孔隙,溶蚀孔隙和晶间孔

是较常见的孔隙类型。茅口组滩相灰岩在热液流体的交代作用下,形成细—中晶云岩,自形—半自形白云石晶体间发育晶间孔,同时热液流体会对基质灰岩发生强烈的溶蚀作用,形成热液溶孔一般具有不规则的“港湾状”溶蚀边缘,孔径介于200~1000 μm (图4a),面孔率可达8%,沿孔隙边缘可见鞍状白云石半充填,另一方面这些溶孔仍可受到后期的胶结破坏,如硅质、白云石和方解石的胶结。该类热液白云岩主要由高能的砂屑—生屑滩相灰岩存在的早期孔隙为热液白云岩化改造提供了优越的疏导系统,热液沿孔隙或裂隙向上或者横向入侵,使其发生充分的交代作用,从而形成热液白云岩,并产生部分溶蚀空间(图12e,f)。华蓥二崖茅口组二段细中晶白云岩、发育晶间孔隙、面孔率2.8%,丰都放牛坝残余生屑细晶云岩、发育晶间孔隙、面孔率0.8%^[25],过度云化作用后成嵌晶状,孔隙消失殆尽,部分溶孔又被方解石和硅质充填(图12h),部分显示为鞍形白云石衬缝壁生长,方解石充填晶间孔(图12i)。

4.3 部分充填裂缝和晚期裂缝

主要表现为早期裂缝未被完全充填,残余部分空间(图12d,e),晚期在白云岩中形成的裂缝,如泰来6井5491.89 m 段泥晶灰岩(右边)内裂缝充填白云石和方解石,发育2组裂缝,1条裂缝内充填鞍形白云石(图12g),另1条充填鞍形白云石和方解石,且后期又发生破裂,缝率约4%。

综上所述,储层发育程度主要受控于沉积相带和早期溶蚀情况,如内缓坡暴露颗粒滩,滩体厚度较大、面积大,水体能量高,早期暴露溶蚀作用强,热液白云岩化作用适度,恢复其原始颗粒形态^[26],可保留一定孔渗性;对于内缓坡下部—中缓坡内未暴露颗粒滩,滩体厚度较小,准同生期溶蚀—热液白云岩化作用弱,如泰来6井深度5485~5512 m 段为热液白云岩层夹灰岩层,云质灰岩层孔隙度较低,而砂屑灰岩热液云化后则有一定孔渗性。因此初始孔隙发育的砂屑灰岩热液云化后,白云岩化对储层的贡献体现在形成溶蚀孔洞和晶间溶孔,可成层或在断裂附近分布,同时形成抗压溶格架,有利于储层的保存^[27]。对于规模有效储集体来讲,沉积相精细刻画是热液白云岩储层评价预测的关键。

5 结论

1) 确认四川盆地东部茅口组白云岩为热液白云岩

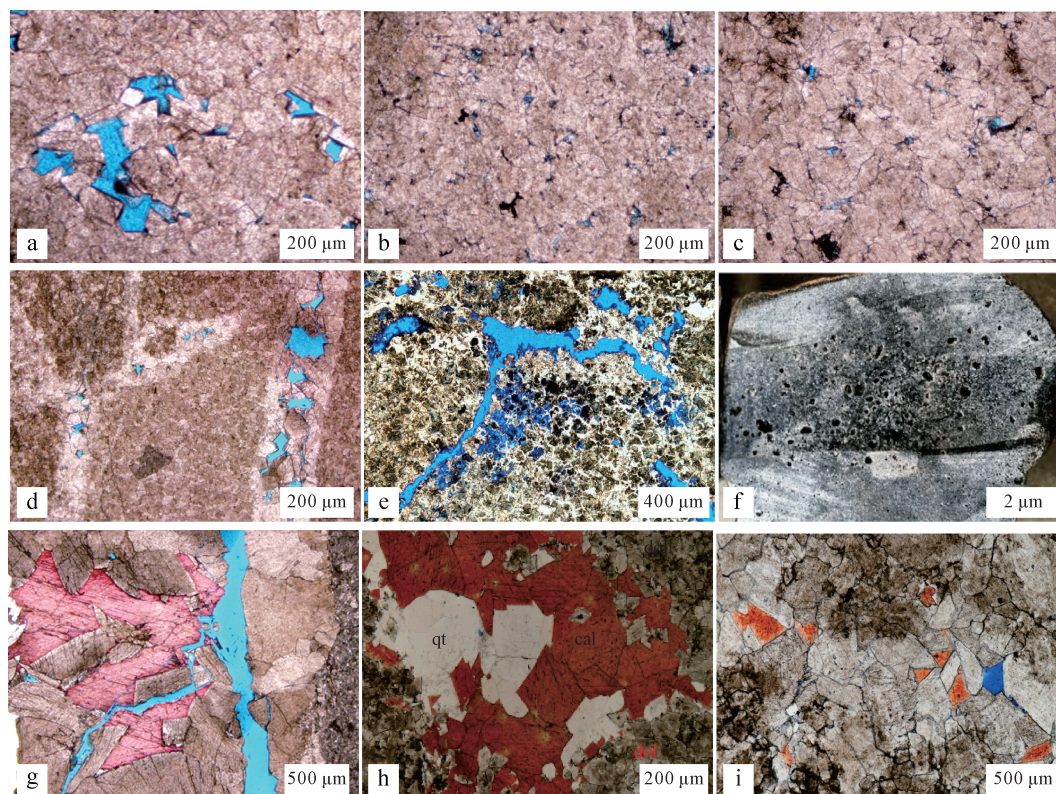


图 12 四川盆中二叠统茅口组热液白云岩化作用对储层的改造特征

Fig. 12 Modification characteristics of HTD on reservoir properties of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin

a. 狗子水剖面, 细晶白云岩, 大量晶间孔 (勘探分公司, 2018); b. 泰来 6 井, 埋深 5 510.46 m, 细晶白云石, 半自形镶嵌接触, 见晶间孔; c. 泰来 6 井, 埋深 5 491.02 m, 细晶白云岩, 半自形镶嵌接触, 部分晶间孔内充填沥青, 偶见晶间溶孔, 面孔率 2%; d. 泰来 6 井, 埋深 5 505.70 m, 细晶白云岩, 半自形镶嵌接触, 3 条裂隙内充填晶粒白云石, 具晶间孔, 微裂隙; e. 华蓥二崖灰质白云岩, 见热液溶蚀缝; f. 广探 2 井, 埋深 4 712.00 m, 细晶白云岩, 见热液溶蚀孔洞, 面孔率 8%; g. 泰来 6 井, 埋深 5 491.89 m 泥晶灰岩 (右边) 内裂隙充填白云石和方解石, 发育 2 组裂缝, 1 条裂缝内充填鞍形白云石, 另 1 条充填鞍形白云石和方解石, 且后期又发生破裂, 缝率约 4%; h. 丰都放牛坝, 细晶云岩, 溶缝充填石英 (qt) 和方解石 (cal); i. 丰都放牛坝, 中-粗晶白云岩, 鞍形白云石衬缝壁生长, 方解石充填晶间孔 (e-f 引自文献 [25])

化作用成因, 热液矿物组合、包裹体均一温度和埋藏史相结合是判识热液白云岩化作用的主要方法, 茅口组热液流体来自茅口组以下的沉积层系, 火山岩活动为热液白云岩化作用提供地热场, 而不是直接提供流体。

2) 该区热液白云岩的分布特征主要受基地断裂沟通和高能滩相分布的联合控制, 热液改造事件发生在晚二叠世—早三叠世构造拉张期, 茅口组处于在浅埋藏、早成岩期, 热液流体可通过断裂将渗透层云化改造成具有成层性的白云岩; 热液白云岩化作用对储层的改造具有选择性, 高能滩相是有效储层发育的关键, 过度云化作用破坏储集性。

3) 综合构造演化、成岩序列和测年分析确定热液白云岩化时间、北西向基底断裂的性质与演化、沉积相精细研究及滩体预测是研究该区热液白云岩化作用模式及发现茅口组规模有效储集体的重点。

致谢: 中石化勘探分公司在岩心观察、薄片及相关资料方面提供帮助, 审稿老师给予详细和中肯的建议, 在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 何幼斌, 冯增昭. 四川盆地及其周缘下二叠统细-粗晶白云岩成因探讨[J]. 江汉石油学院学报, 1996, 18(4): 15-20.
He Youbin, Feng Zengzhao. Origin of fine-to coarse-grained Dolostones of Lower Permian in Sichuan Basin and its peripheral regions [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1996, 18(4): 15-20.
- [2] 王运生, 金以钟. 四川盆地地下二叠统白云岩及古岩溶的形成与峨眉地裂运动的关系[J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(1): 8-16.
Wang Yunsheng, Jin Yizhong. The formation of dolomite and paleokarst of the lower permian series in Sichuan Basin and the relation to the Emei taphrogenesis [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997, 24(1): 8-16.
- [3] 蒋志斌, 王兴志, 曾德铭, 等. 川西北下二叠统栖霞组有利成岩作用与孔隙演化[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 101-109.
Jiang Zhibin, Wang Xingzhi, Zeng Demin, et al. Constructive diagenesis and porosity evolution in the Lower Permian Qixia Formation of Northwest Sichua [J]. Geology in China, 2009, 36(1): 101-109.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 杨光, 汪华, 沈浩, 等. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向[J]. *天然气工业*, 2015, 35(7): 10–16.
Yang Guang, Wang Huan, Shen Hao, et al. Characteristics and exploration prospects of Middle Permian reservoirs in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(7): 10–16.
- [8] 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): 442–458.
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): 442–458.
- [9] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (11): 1641–1690.
- [10] 刘宝珩, 许效松. 中国南方岩相古地理图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 12–34.
Liu Baojun, Xu Xiaosong. Maps of paleo-lithofacies, South China [M]. Beijing: Science Press, 1993: 12–34.
- [11] Sun Q A. Reappraisal of dolomite abundance and occurrence in the Phanerozoic [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64 (2): 396–404.
- [12] 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.
- [13] 张涛, 苏玉山, 余刚, 等. 热液白云岩发育模式—以扎格罗斯盆地白垩系 A 油田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 393–401.
Zhang Tao, Su Yushan, She Gang, et al. A study on the genetic model of hydrothermal dolomitization-taking oilfield A in the Cretaceous in Zagros basin as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 393–401.
- [14] 卿海若, 陈代钊. 非热液成因的鞍形白云石: 来自加拿大萨斯喀彻温省东南部奥陶系 Yeoman 组的岩石学和地球化学证据[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 981–986.
Qing Hairuo, Chen Daizhao. Non-hydrothermal saddle dolomite: Petrological and geochemical evidence from the Ordovician Yeoman Formation, southeastern Saskatchewan, Canada [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 981–986.
- [15] 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 Petrologica Sinica*, 2017, 38(4): 386–398.
- [16] 黄思静, 黄喻, 兰叶芳, 等. 四川盆地东北部晚二叠世—早三叠世白云岩与同期海水锶同位素组成的对比研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(12): 3832–3842.
Huang Sijing, Huang Yu, Lan Yefang et al. A comparative study on strontium isotope composition of dolomites and their coeval seawater in the Late Permian-Early Triassic, NE Sichuan basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12): 3832–3842.
- [17] 王利超, 胡文瑄, 王小林, 等. 白云岩化过程中锶含量变化及锶同位素分馏特征与意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 464–472.
Wang Lichao, Hu Wenxuan, Wang Xiaolin, et al. Variation of Sr content and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope fractionation during dolomitization and their implications [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(4): 464–472.
- [18] 罗志立, 孙玮, 韩建辉, 等. 峨眉山幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨[J]. *地质前缘*, 2012, 19(6): 144–154.
Luo Zhili, Sun Wei, Han Jianhui, et al. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian petroleum accumulation in middle-upper Yangtze Area [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 144–154.
- [19] 李华芹, 王登红, 任海涛, 等. 四川攀西地区层状基性—超基性岩体 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(5): 691–697.
Li Huaqin, Wang Denghong, Ren Haitao, et al. Zircon SHRIMP U–Pb age of the layered mafic rock mass in Panxi area, Sichuan Province, and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(5): 691–697.
- [20] 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南 [M]. 北京: 地质出版社, 2001: 41–43.
All-China Stratigraphic Commission. Chinese stratigraphic guide and Chinese stratigraphic guide [M]. Beijing: Geological Press, 2001: 41–43.
- [21] 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. Geothermal response of mount Emei basalt eruption in Sichuan Basin [J]. *Science China Press*, 2010, 55(6): 474–482.
- [22] 李任伟, 吴俊, 吴汉国. 四川南桐地区二叠系长兴组和茅口组灰岩中沥青的来源[J]. *地质科学*, 1992, (S1): 178–189.
Li Renwei, Wu Jun, Wu Hanguo. Study of sources of solid bitumens in limestones of Permian Maokou and Changxing groups in Nantong area, Sichuan province, China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992 (S1): 178–189.