

四川盆地中二叠统中-粗晶白云岩成因

江青春,胡素云,汪泽成,王铜山,李秋芬,翟秀芬

(中国石油 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:通过对四川盆地及其周缘地区中二叠统野外露头及典型井的岩心微观薄片的观察,发现中二叠统主要发育细晶白云岩、中粗晶白云岩与灰质云岩。物性分析表明,中-粗晶白云岩储层物性最好,可以作为有效储层;结合地质背景,对-中粗晶白云岩开展的多种地球化学分析,认为中-粗晶白云岩为深部热液成因,云化流体来自于深部热液。其成因证据包括以下5个方面:单井岩心和微观照片显示中-粗晶白云岩具有鞍状白云石特征,并伴有低温热液矿物;中-粗晶白云石中发育气、液烃流体包裹体,包裹体均一化温度较高,白云石化流体温度明显高于围岩温度,且中二叠统中-粗晶白云石两相流体包裹体基于冰点温度测试的盐度是正常海水的3~5倍,成岩流体为高盐度流体;中-粗晶白云岩稳定氧同位素值极偏负,均在-9‰以下,多数样品的测试值高达-13‰;中-粗晶白云岩的Sr同位素具有幔源特征,反映深部热液特征;白云岩横向和纵向分布变化快,目前已发现的白云岩主要沿深大断裂与火山岩发育地区分布。中-粗晶白云岩的晶间溶孔多为沥青充填,结合典型井的埋藏史、包裹体均一温度及烃源岩的成烃史分析,认为中-粗晶白云岩形成时间较早,至少在中-晚三叠世油气大量充注之前。在以上分析基础上,利用发育白云岩的典型井及地震剖面,结合成因认识建立了中-粗晶白云岩的热液成因模式。

关键词:热液;成因模式;白云岩;中二叠统;四川盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Genesis of medium-macro-crystalline dolomite
in the Middle Permian of Sichuan Basin

Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, Wang Tongshan, Li Qiufen, Zhai Xiufen

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Observation of the Middle Permian outcrops and thin sections of cores from typical wells in Sichuan Basin and its periphery reveals that the Middle Permian consists mainly of micro-dolomite, medium-macro-crystalline dolomite and calcitic dolomite. And the petrophysical properties analysis shows that reservoir quality of the medium-macro-crystalline dolomite is the best, so it can act as effective reservoir. Various geochemical analyses in combination with the geological background indicate the medium-macro-crystalline was formed by the deep thermal fluids. There are five major evidences concerning their genesis. The medium-macro-crystalline shows the characteristics of saddle-dolomites and is associated with some low temperature hydrothermal minerals; Gas-liquid hydrocarbon fluid inclusions with homogenization temperature higher than the surrounding rocks occur in the medium-macro-crystalline, and the salinity of two phase fluid inclusions tested based on the freezing point temperature is three to five times of normal sea water, indicating high salinity diagenetic fluids; The stable isotope values are extremely biased, and they all are less than -9‰ and mostly are up to -13‰; Their Sr isotopes have the characteristics of mantle-derived medium-macro-crystalline dolomite, indicating the existence of deep thermal fluids; The lateral and vertical distributions of dolomite vary dramatically, and dolomites are found to distribute along the deep-large faults and in areas with volcanic rocks. Most of the intergranular dissolved pores of medium-macro-crystalline dolomite are filled by asphalt. Comprehensive analysis based on the bury history of typical wells, homogenization temperature of fluid inclusions and hydrocarbon generation history of source rock reveals that the medium-macro-crystalline dolomites were formed early, at least prior to the Middle-Late Triassic, when large amount of hydrocarbons were charged. Based on the above mentioned analysis, a hydrothermal genetic model was established for the medium-macro-crystalline dolomite was established by using the typical wells and seismic profiles.

Key words: hydrothermal fluid, genetic model, dolomite, Middle Permian, Sichuan Basin

收稿日期:2013-10-28;修订日期:2014-02-10。

第一作者简介:江青春(1980—),男,博士、工程师,石油地质。E-mail:jiangqc@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05004-001)。

白云岩的成因一直是国际研究的热点和难点问题之一^[1-8],诸如混合水白云化、蒸发泵白云石化和埋藏白云石化研究为主要的热点成因机制,国内外有较多的相关报道^[9-13]。但近十几年来,白云岩的成因研究取得了一定的进展,提出了微生物白云石化与热液白云石化成因机制^[14-18],如 Davies 认为西加盆地二叠系白云岩为热液成因机制^[19]。这些新成因机制的研究,对建立沉积盆地的白云岩分布预测地质模型,具有重要的理论和实际意义。

本文所研究的四川盆地中二叠统,主要为海相碳酸盐岩沉积,其间分布有厚度不等的白云岩(图 1)。对于海相碳酸盐岩研究,前人已从岩相古地理、成藏潜力、储层特征等方面开展了大量的工作,且取得了不少成果^[20-30]。而白云岩的研究,也进行了不少的工作并取得一些成果,但多数研究仅仅局限于川西地区,且一般认为栖霞组-茅口组白云岩是受高能相带控制下的混合水白云化成因,也有少数人认为是热液成因^[31-37],但并未展示足够的成因证据。同时对于其微观岩石学特征、白云岩的形成时间等科学问题也未有明确回答,这些问题严重制约着四川盆地中二叠统的天然气勘探。本文通过开展宏观地质分析、微观薄片鉴定与多种岩石微区地球化学分析技术联合研究,认为研究区中-粗晶白云岩主要为热液成因,并提出了其成因证据,建立了成因模式。

1 中-粗晶白云岩特征

为了对中二叠统白云岩的微观分布特征进行全面

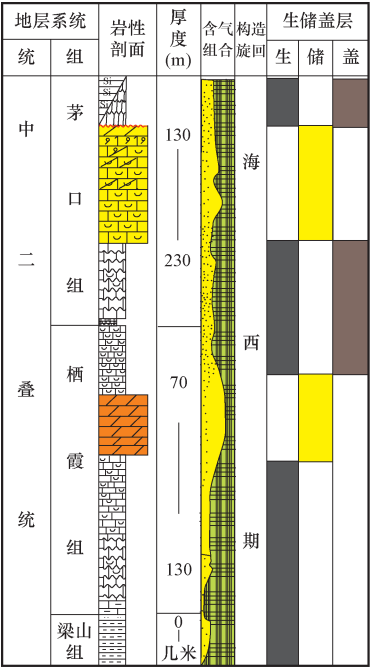


图 1 四川盆地中二叠统含油气系统综合柱状图
Fig. 1 Composite histogram of the Middle Permian petroleum system in Sichuan Basin

了解,分析不同类型白云岩作为储层的有效性,笔者对川西北部和川中地区发育白云岩的 3 条典型野外露头剖面,以及全盆地 5 口发育白云岩的探井的井下岩心制作了微观薄片,并进行了分析鉴定。从川西北的长江沟剖面到川西南的峨眉山张村剖面,从川东北的华蓥山到川中的广参 2 井下,共观察鉴定了 480 余块白云岩薄片。研究区共发育四种类型的白云岩,即细晶白云岩、中晶白云岩、粗晶白云岩和豹斑(灰质)白云岩,由于在微观薄片下中晶与粗晶经常相伴出现,因此归为一类研究。

1.1 中-粗晶白云岩的微观特征

中-粗晶白云岩在本区比较发育。通过对 480 块白云岩微观薄片白云石晶体粒径的统计分析,中-粗晶白云岩约占白云岩总数的 52%。主要由中-粗晶大小的白云石颗粒组成,晶粒直径分布在 0.3~0.6 mm,多数白云石晶体为非平面半自形晶到非平面它形晶,统计表明非平面半自形晶-非平面它形晶占有所有类型白云石晶体的 73%,只有 27%的中-粗晶白云石为平直晶面自形晶到平直晶面半自形晶。同时白云石的母岩原始结构基本不保存或保存较差,局部可见残存的藻屑或砂屑幻影(图 2)。多数中-粗晶白云石具有波状消光特征,反映其可能在成岩改造过程中受过构造热力学的影响。部分残存有藻屑幻影,表明其母质来源为藻屑微晶灰岩。晶体的晶型特征反映白云石化过程较快,白云化流体快速选择性地交代文石质或高镁

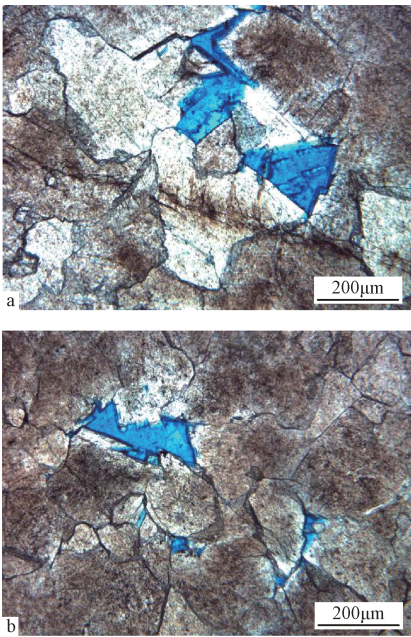


图 2 研究区中-粗晶白云岩结构特征
Fig. 2 Structure characteristics of the medium-macro-crystalline dolomite in the study area
a. 汉深 1 井,粗晶白云岩,栖霞组,埋深 4 965.6 m;
b. 汉深 1 井,粗晶白云岩,栖霞组,埋深 4 977.5 m

方解石质亮晶藻屑,而相对较为致密的泥晶藻屑具有未完全交代的残余幻影。

1.2 中-粗晶白云岩的孔隙类型及物性特征

为了了解中-粗晶白云岩的储集空间性能,对研究区上述480块白云岩薄片的微观孔隙特征进行了分析,发现研究区中二叠统的中粗晶白云岩的孔隙类型主要以次生孔隙为主,原生的粒间孔和晶间孔并不发育。其中,晶间溶孔最为发育,且部分晶间溶孔中具有沥青充填。显微镜下对细晶白云岩、中-粗晶白云岩和灰质白云岩的面孔率进行了统计,并结合250组岩心分析的物性数据,编制了中二叠统3种类型白云岩的孔-渗直方图(图3)。其中,中-粗晶白云岩的面孔率一般在4%~8%,少数大面积的溶蚀较高的薄片,面孔率甚至超过部分薄片视域的20%。物性数据统计分析表明中-粗晶白云岩储集物性最好,平均孔隙度一般在5%左右,渗透率一般为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,可以作为有效储层;细晶白云岩和灰质白云岩物性相对较差,但在局部溶孔和裂缝发育的条件下也可作为有效储层。

2 中-粗晶白云岩成因

在对野外剖面、岩心微观岩石学分析的基础上,运用多种岩石地球化学数据、结合宏观的构造地质背景,

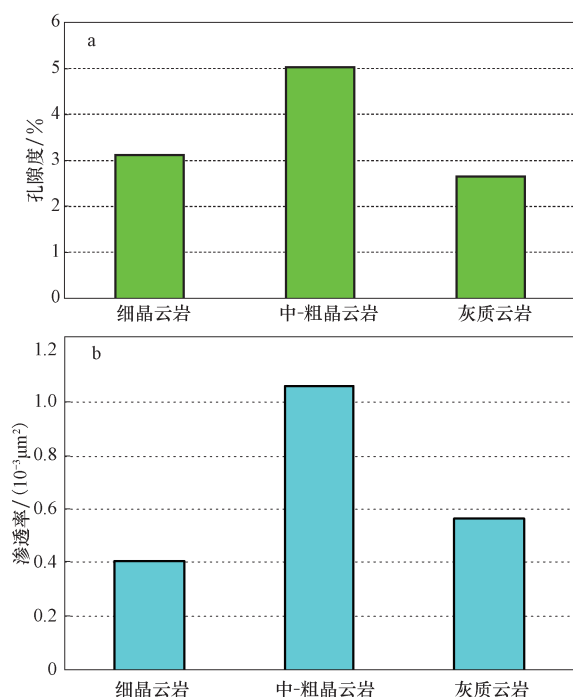


图3 四川盆地中二叠统白云岩物性分析直方图

Fig. 3 Petrophysical property histogram of the Middle Permian dolomite in Sichuan Basin

a. 中二叠统白云岩孔隙度直方图; b. 中二叠统白云岩渗透率直方图

认为四川盆地中二叠统中粗晶白云岩化主要为热液白云岩,局部可能存在埋藏白云岩化。通过白云岩在钻井岩心与野外露头上的分布特征及地震剖面上的响应,建立了本区的热液白云石化模式。本文所涉及的地球化学分析测试样品采自四川盆地西北部剑阁县的长江沟剖面、旺苍剖面、川西南部的峨眉山张村剖面、乐山沙湾剖面、川中东部华蓥山剖面及川西北的矿2井(样品深度2 231~2 462 m)、汉1井(5 060~5 120 m)、汉深1井(4 962~4 999 m)、广参2井(4 595~4 620 m)和女深1井(4 394~4 430 m)。样品的选送均按照微观薄片鉴定的晶体大小所在位置进行编号。

2.1 矿物岩石学证据

从多口井的微观薄片岩心照片上可发现中-粗晶白云岩的晶间溶孔或溶洞中存在多种低温热液矿物,如自生石英、鞍形白云岩、萤石、黄铁矿等,常充填于溶蚀的孔洞中。例如在长江沟剖面中,中-粗晶白云岩晶间孔中可见明显的自生伊利石和地开石。另外,中-粗晶白云石镜下可见明显的波状消光特征(图4),表明中-粗晶白云岩在白云石化过程中受到了异

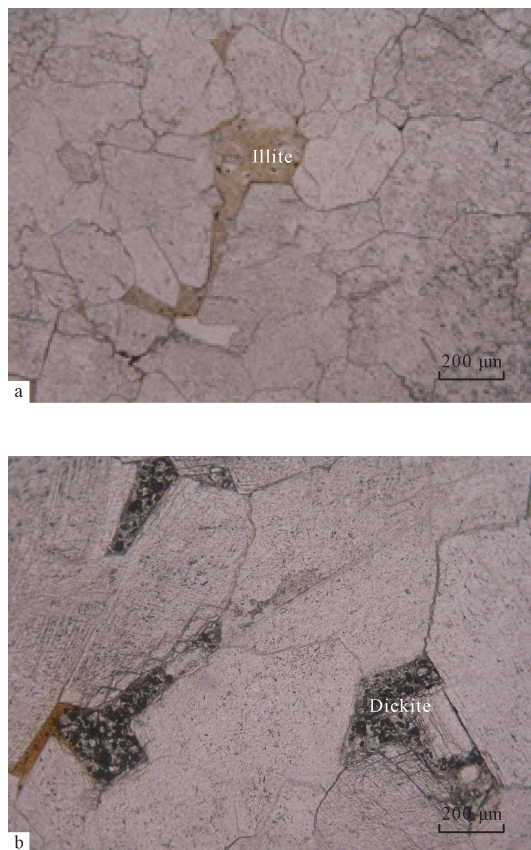


图4 四川盆地中-粗晶白云岩岩石学结构特征

Fig. 4 Petrological structure characteristics of medium-macro-crystalline dolomite in the study area

a. 长江沟剖面,栖霞组,晶间溶孔充填的自生伊利石(照片中部); b. 长江沟剖面,栖霞组,低温热液矿物地开石(Illite. 伊利石; Dickite. 地开石)

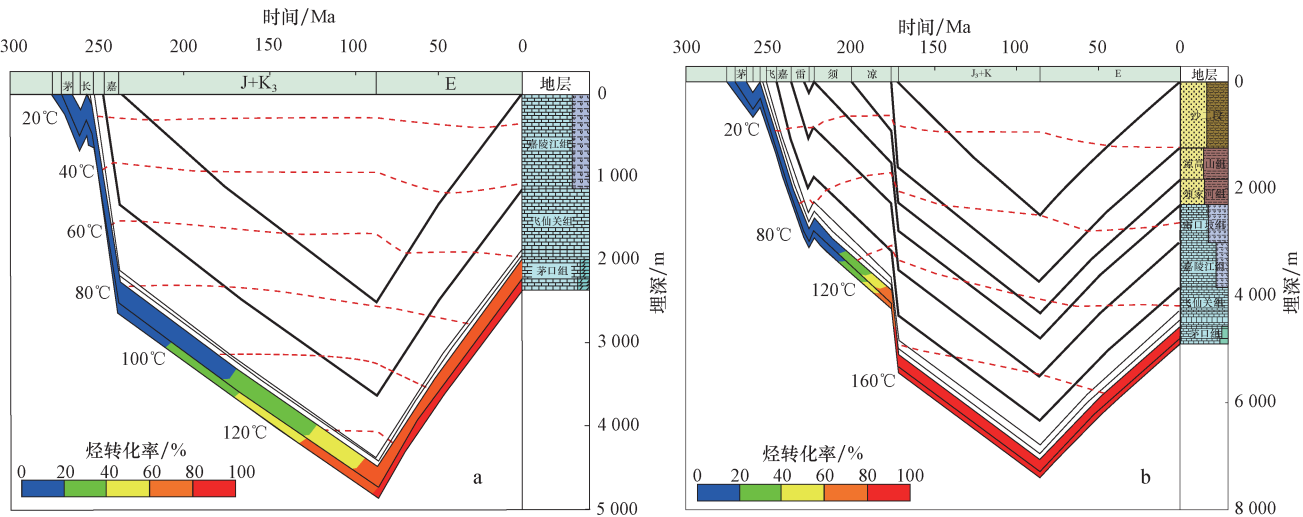


图 5 白云岩发育的典型井的埋藏史

Fig. 5 Single well burial history of typical wells with well-developed dolomite

a. 矿 2 井单井埋藏史;b. 广参 2 井单井埋藏史

茅：茅口组；长：长兴组；飞：飞仙关组；嘉：嘉陵江组；雷：雷口坡组；须：须家河组；凉：凉高山组

常热事件的影响。另外 Davies 等的研究也认为,石英、伊利石、萤石、黄铁矿、重晶石、沥青是典型的低温热液矿物^[19]。

2.2 地球化学证据

2.2.1 包裹体均一温度及成分盐度特征

对于热液白云岩一般认为其成岩流体要高于围岩温度 5℃。为了分析本区中粗晶白云岩的白云石化流体与围岩温度的高低,对川西地区的汉深 1 井、汉 1 井、矿 2 井及川中地区的广参 2 井的含烃盐水包裹体进行了均一温度的测定,共开展了 68 件 240 个包裹体温度数据的测定。测温数据表明,白云石中发育高温包裹体,总体可见 3 期包裹体,分别分布于中-粗晶白云石晶粒内部,白云石胶结物中和溶洞-裂缝中充填的白云石中。结合前人对中二叠统古地温梯度的分析,开展了矿 2 井和汉深 1 井的埋藏史分析,表明矿 2 井栖霞组历史上的最大埋深为 4 500 m,对应的古温度为 116℃,远低于流体包裹体均一温度 120~195℃。另外,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分布于 180℃~220℃,也具有类似的情况(图 5)。以上包裹体温度数据的分析表明,中-粗晶白云岩在其白云石化作用过程中明显受到峨眉山玄武岩高温热事件影响。同时 23 个包裹体盐度测试数据显示 70%包裹体内盐度超过 16%,是正常海水的 3~5 倍,表明白云石化流体为高盐度流体,流体为深层热液卤水。

同时在薄片分析过程中,从矿 2 井、广参 2 井和汉深 1 井的微观薄片中可以观察到晶间溶孔中存在大量的沥青,而根据上述单井埋藏史结合储层包裹体的均

一温度,表明栖霞组-茅口组烃源岩大量生烃时期为中-晚三叠世。因此,晶间溶孔形成的时间要早于油气充注的时间,白云石基质形成的时间要早于晶间溶孔的形成时间。由此可以推断,白云石的形成时间至少要早于中-晚三叠世。

2.2.2 中-粗晶白云岩碳、氧同位素

本次分析碳、氧同位素样品共计 50 件,其中海相泥-微晶灰岩 6 件,中-粗晶白云岩 41 件,晶洞中充填白云石 3 件。送中国石油勘探开发研究院、西南油气田分公司勘探开发研究院及核工业地质研究院地质实验室测试分析,样品测试结果准确可靠,精度能满足研究要求,各类样品的碳、氧同位素分析结果见表 1。

目前,虽然国内外学者对于碳、氧同位素地球化学在白云岩研究中尚存在争论^[38-39],但稳定碳、氧同位素依然是白云岩成因分析的一个重要工具。特别是氧同位素受温度、大气淡水稀释与蒸发作用的敏感性较强。因此,白云石的稳定碳、氧同位素成分会更好反映重结晶作用或交代作用时成岩流体的地化特征;也可用来研究各种成因类型白云岩,在各阶段的白云岩化作用过程中,成岩流体性质和古水文条件。研究区样品

表 1 碳、氧同位素分析数据

Table1 Carbon and oxygen isotope analysis data

碳酸盐岩分类	样品数/个	$\delta^{13}\text{C(PDB)}/\%$		$\delta^{18}\text{O(PDB)}/\%$	
		变化范围	平均值	变化范围	平均值
泥晶灰岩	6	2.60~4.20	3.90	-4.40~-5.80	-4.80
中-粗晶白云岩	41	1.87~5.30	3.30	-7.03~-14.20	-10.30
晶洞中充填白云岩	3	2.23~4.50	3.27	-8.30~-12.90	-10.50

的中-粗晶白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 1.87‰~5.3‰,与同期海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较小,表明同位素本身受温度影响较小,因此碳的来源应主要为无机成因,有机成因的作用极微弱。随成岩作用的进行和白云化流体对微晶灰岩的改造,逐步白云石化,碳同位素的变化趋势表明该地质时期内生物由盛转衰,可能与峨眉地裂早期运动引起的热异常有关,与上扬子地区石炭纪-二叠纪时间间隔内 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高的大背景一致。

从图 6 可以看出,栖霞组-茅口组的微晶灰岩氧同位素值一般在 -4‰~-6‰,表明同期海水的氧同位素值介于二者之间,而中-粗晶白云岩样品的氧同位素值在 -7‰~-15‰,且多数小于 -9‰,温度升高和大气淡水稀释与碳酸盐岩氧同位素呈负相关。然而中-粗晶白云岩中的流体包裹体均一温度范围较高,为 120~220℃,可以排除地表/近地表大气降水的影响。白云岩中贫乏的 $\delta^{18}\text{O}$ 通常被用来指示白云石为高温作用的产物,一般小于 -9‰就被认为是热液成因,研究区的中-粗晶白云岩明显受到了高温作用的影响。

2.2.3 中-粗晶白云岩锶同位素

本次研究锶同位素样品共计 20 件,其中海相泥-微晶灰岩 3 件,中-粗晶白云岩 14 件,晶洞中充填白云石 3 件。锶同位素测试由核工业地质研究院同位素实验室完成,测试仪器为 ISOPROBE-T 热电离质谱仪,实验条件为温度 20℃,相对湿度 20%,检测依据采用美国国家标准局标准样品 NBS987,分析结果见表 2。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分析误差范围为 0.000 007~0.000 014,平均误差为 0.000 01,所有样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围均在 0.000 15 以下,样品的分析结果和精度能满足研究要求。

四川盆地中二叠统中-粗晶白云岩 $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 比值介于 0.706 9~0.707 8,平均值为 0.707 3。而研究区的中二叠统泥晶灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值介于 0.708 5~0.708 8,平均值为 0.708 6,与 Veizer 提出 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素曲线中中二叠统海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位

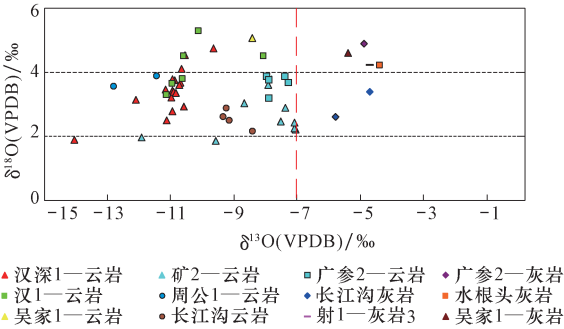


图 6 中二叠统中-粗晶白云岩及泥晶灰岩碳、氧同位素交汇图
Fig. 6 C-O isotopic crossplot of medium-macro-crystalline dolomite and micrite crystalline limestone in Middle Permian

表 2 各类碳酸盐岩和胶结物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值
Table 2 Range and average values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of various carbonate rocks and cements

碳酸盐岩分类	样品数/ 个	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	
		变化范围	平均值
泥晶灰岩	3	0.708 502 ~ 0.708 830	0.708 621
中-粗晶白云岩	14	0.706 901 ~ 0.707 863	0.707 302
晶洞中充填白云岩	3	0.707 667 ~ 0.708 215	0.707 841

素比值 0.7 084 相当,基本能够反映同期海水的 Sr 同位素特征。公开文献研究表明峨眉山玄武岩的 $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 同位素比值介于 0.704 5~0.706 5。众所周知,地质历史中海水的锶同位素组成是时间的函数,其随时间的变化主要受两个来源的控制:由大陆古老的硅铝质岩石化学风化作用,通过河流向海水提供的相对富放射性成因的 ^{87}Sr 主要来自放射性元素 Rb 的衰变,具较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,全球平均值为 0.711 9^[40];由洋中脊热液系统向海水提供的相对贫放射性成因的 Sr^{86} ,具较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,全球平均值为 0.703 5^[40];现代海水的锶同位素比值便是这两个来源锶平衡的结果,其平均值为 0.709 073 ± 0.000 003^[41]。基于上述原理,当海相碳酸盐岩沉积物形成的时候,它们从海水或成岩流体中获取锶,而没有锶同位素的分馏^[42],因而保存了其形成时的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,为研究古代碳酸盐岩成岩流体性质提供了可靠的记录。本区的白云石及胶结物的白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值数据对比表明,中-粗晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值要明显低于中二叠世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值,而高于峨眉山玄武岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值(图 7),表明白云石化流体贫放射性的 ^{87}Sr ,而相对富集 ^{86}Sr 。众所周知,深部地幔的熔融基性岩浆岩通常具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,四川盆地峨眉地幔柱在东吴运动末期的

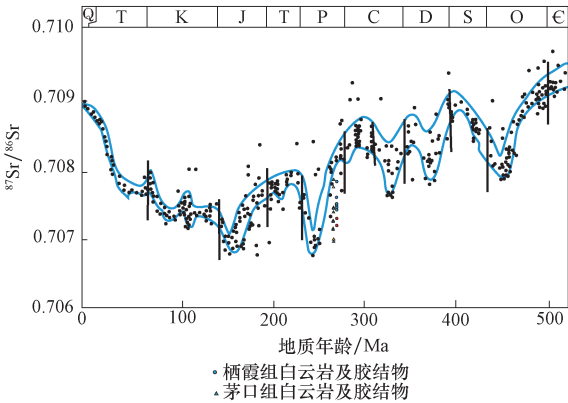


图 7 中二叠统中-粗晶白云岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值数据与锶同位素曲线对比
Fig. 7 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of medium-macro-crystalline dolomite in the Middle Permian compared with strontium isotope curves

活动导致玄武岩的喷发,为典型的基性火山岩,在喷发前期、过程中及喷发后期,深部热液沿着基底断裂向上运移,使中二叠统上部高能滩相灰岩和早期形成的粉细晶白云岩发生云化作用,并伴有低温热液矿物地开石、石英等。由此可以认为中二叠统中-粗晶白云岩的成岩流体为东吴期峨眉山玄武岩喷发前或喷发后期慢源热液与同时期海水混合作用的结果,且以慢源热液作用占主导地位。

2.3 热力学背景

前人研究表明,四川盆地二叠纪火山活动引起的峨眉山玄武岩喷发事件发生在 259 Ma,为茅口期与龙潭期之间的地质时间间隔内,由峨眉地幔柱活动导致的火山喷发。以峨眉山为喷发中心,在川西北部、川西南部及川中东部地区均有火山岩沉积,川西地区主要为玄武岩,川东地区主要为辉绿岩。前述的埋藏史和热史演化也记录了中、晚二叠世这一异常的热事件,在中二叠世末、晚二叠世初古热流值达到极值,盆地西南部的大多钻井及盆地东北部个别钻井古热流值超过了 100 mW/m^2 ,盆地中部、北部及东北部多数钻井古热流值为 $60 \sim 80 \text{ mW/m}^2$ (图 8),火山作用的强烈热对流及岩浆对地层的“烘烤”作用,克服了白云石化的热动力学障碍,使灰岩白云石化。晚二叠世后热流值持续降低,伴随峨眉地裂运动的结束。白云岩的分布与古热流值的分布、玄武岩喷发及分布范围及基底断裂的分

布有良好的对应性,主要分布于盆地的西北部、西南部和中部地区。古热流值的平面分布、玄武岩的分布范围、东吴运动时空上的变化均具有相同的规律,均为盆地的西南早于和强于中-东北部(图 8)。此时期盆地的构造运动以拉张运动为主,拉张、走滑断层及裂缝系统发育,大川中过广参 2 井的地震剖面可见明显的走滑断层。热液总与断裂伴随,川西北地区栖霞组白云岩具有溶蚀、垮塌角砾化等特征,且横向厚度变化较大。深大断裂切穿碳酸盐岩下的含水层,使下伏地层中的热液流体随断层、裂缝通道向上运移,使灰岩颗粒及基质白云化。

2.4 白云岩成因模式

本区的白云岩特征及成因分析表明,中二叠统白云岩受原始沉积环境、热异常与深大断裂发育控制,白云岩在低能滩部位白云石化程度高,同时白云岩的分布范围与茅口组顶部的玄武岩和辉绿岩分布具有高度的一致性,但白云岩在横向上分布变化快,非均质性强,川西北的矿山梁地区矿 2 井和矿 3 井相距很近,但矿 2 井栖霞组白云岩发育而矿 3 井却很不发育。另外在川西南地区的张村剖面上,可以明显见到白云岩沿着断裂及其附近的裂缝带分布,且具有由上向下云岩逐渐减少的特征,在远离断裂的部位主要以泥晶灰岩为主,明显受断裂分布的影响,表现出了典型的热液白云岩的特征,由此提出了四川盆地中二叠统白云岩的成因模式(图 9)。

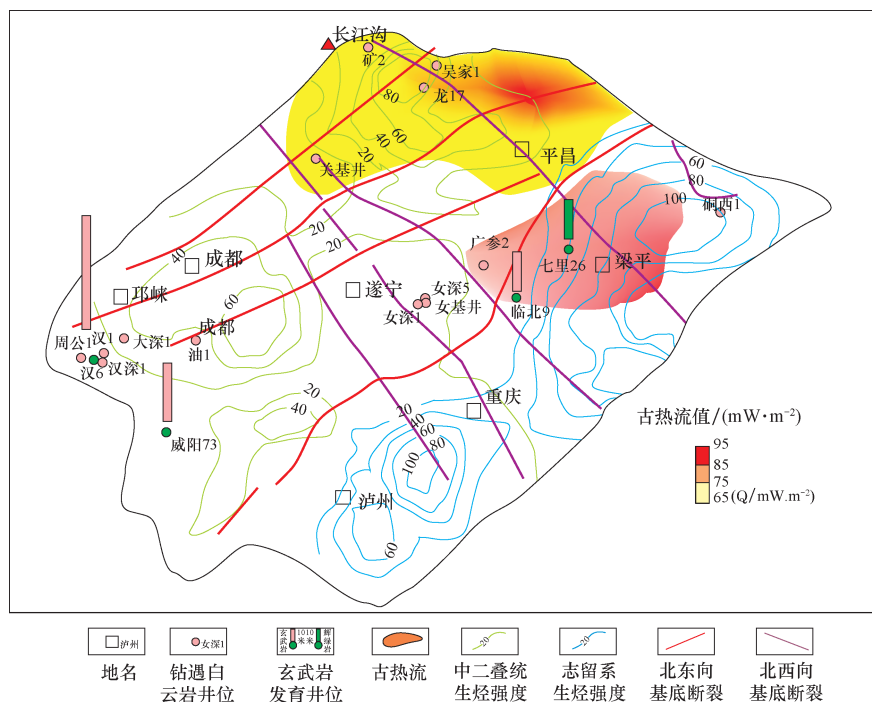


图 8 东吴运动时期古热流分布与基底断裂、火山岩及白云岩分布叠合图

Fig. 8 Ancient hydrothermal fluid distribution map in the Dongwu movement period with basement faults, volcano rocks and dolomites distribution overlaid

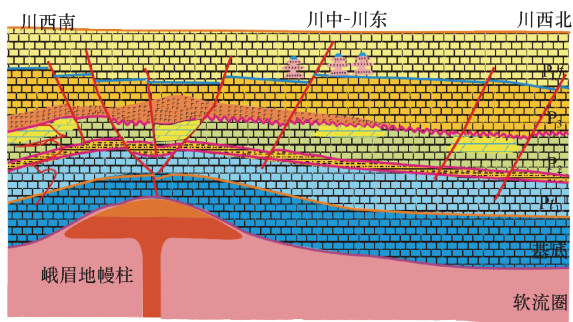


图9 四川盆地中二叠统白云岩热液成因模式

Fig. 9 Hydrothermal genetic model of dolomite in the Middle Permian of Sichuan Basin

东吴运动的早期或晚期的岩浆活动,导致地幔深部的热液沿着深大断裂向上运移,在其向上运移的过程中,将栖霞组-茅口组的高能滩相灰岩和早期的细粉晶白云岩胶代,由于流体的快速运移和反应的不充分性,导致中粗晶白云石多以非平直晶面半自形-它形为主,形成了热液交代白云岩,同时由于岩浆向上运移过程中的烘烤,局部形成烘烤白云岩和局部的溶蚀作用,由于局部微裂缝的存在,侧向上沟通了高能滩体,热液将高能滩体胶代为白云岩。因此热液白云化作用流体运移的途径主要有两种:一种为热液沿深大断裂垂向运移,另一种为沿微裂缝侧向运移。

3 结论

1) 栖霞组-茅口组主要发育细晶白云岩、中-粗晶白云岩与豹斑云岩。物性分析表明中-粗晶白云岩储层物性最好,可以作为有效储层。

2) 中-粗晶白云岩以晶间溶孔发育,溶蚀孔隙中被沥青充填。油气充注史与单井埋藏史及包裹体均一温度综合分析表明,中-粗晶白云岩形成时间早,至少早于油气大量形成的早三叠世中期。

3) 矿物岩石学特征、包裹体均一温度与盐度、碳氧同位素分析、锶同位素分析及中二叠统的地质背景分析认为,中二叠统白云岩为东吴运动早期的深部热异常流体沿断裂、裂缝及高能滩体运移,并将灰岩云化。

参 考 文 献

[1] Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock textures[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(6): 967-975.

[2] 覃建雄, 曾允孚, 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统白云岩成因及储集特征[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(4): 275-284.

Qin Jianxiong, Zeng Yunfu, Yang Junjie. Origin of lower Ordovician dolomite in eastern Ordos basin and its reservoir properties[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(4): 275-284.

[3] 胡明毅, 肖传姚, 龚文平. 湖北随州上震旦统灯影组白云岩成因[J]. *石油与天然气地质*, 1998, 19(1): 83-84, 89.

Hu Mingyi, Xiao Chuantao, Gong Wenping. Origin of dolomites in

Dengying formation, upper Sinian, Suizhou, Hubei. *Oil & Gas Geology*, 1998, 19(1): 83-84, 89.

- [4] Qing H R, Bosence D W J, Rose E P F. Dolomitization by penesaline seawater in Early Jurassic peri tidal platform carbonates, Gibraltar, western Mediterranean[J]. *Sedimentology*, 2001, 48, 153-163.
- [5] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(5): 32-40.
- Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao. Critical problems for dolomite formation and dolomitization models[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(5): 32-40.
- [6] 刘树根, 黄文明, 张长俊, 等. 四川盆地白云岩成因的研究现状及存在问题[J]. *岩性油气藏*, 2008, 20(2): 6-15.
- Liu Shugen, Huang Wenming, Zhang Changjun, et al. Research status of dolomite genesis and its problem in sichuan basin[J]. *Litho-logical Reservoirs*, 2008, 20(2): 6-15.
- [7] 赫云兰, 刘波, 秦善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(6): 1010-1020.
- He Yunlan, Liu Bo, Qin Shan. Study on the dolomitization and dolostone genesis[J]. *Acta Scientiarum Naturalium University Pekinensis*, 2010, 46(6): 1010-1020.
- [8] 杨玉芳, 钟建华, 陈志鹏, 陈鑫. 塔中地区寒武-奥陶系白云岩成因类型及空间分布[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(4): 455-452.
- Yang Yufang, Zhong Jianhua, Chen Zhipeng et al. Genesis types and distribution pattern of the Cambrian and Ordovician dolomites in Tazhong area, the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 455-452.
- [9] 胡忠贵, 郑荣才, 文华国, 等. 川东邻水-渝北地区石炭系黄龙组白云岩成因[J]. *岩石学报*, 2008, 24(6): 1369-1378.
- Hu ZhongGui, Zheng RongCai, Wen HuaGuo, et al. Dolostone genesis of Huanglong Carboniferous in Linshui of eastern Sichuan-northern Chongqing area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6): 1369-1378.
- [10] Jones G D. New geochemical support for mixing-zone dolomitization at Golden Grove, Barbados[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(5): 1160-1170.
- [11] Breesch L, Swennen R. Vincent B. Dolomite cementation and recrystallization of sedimentary breccias along the Musandam Platform margin (United Arab Emirates) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, 106: 34-43.
- [12] 陈辉, 田景春, 张翔, 等. 川东北地区下三叠统飞仙关组鲕滩白云岩成因[J]. *天然气工业*, 2008, 28(1): 42-46.
- Chen Hui, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Dolomitization genetic of the lower triassic Feixianguan group oolitic beach in northeast Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(1): 42-46.
- [13] 陈琪, 胡文瑄, 李庆, 等. 川东北盘龙洞长兴组-飞仙关组白云岩化特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 84-93.
- Chen Qi, Hu Wenxuan, Li Qing, et al. Characteristics and genesis of dolomitization in Changxing and Feixianguan Formations in Panlongdong, northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 84-93.
- [14] Boni M, Iannace A, Bechstaedt T, et al. Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy) and Cantabria (NW Spain); evidence for late-to post-Variscan widespread fluid-flow events[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, (69-70): 225-228.
- [15] Boni M, Parente G, Bechstaedt T, et al. Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy); evidence for a widespread late-Variscan fluid flow event (in Paleofluid flow and diagenesis during basin evolution) [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 131(3-4): 181-200.
- [16] Gasparrini M, Bechstadt T, Booni M. Massive hydrothermal dolomites in the southwestern Cantabrian Zone (Spain) and their relation to the

- Late Variscan evolution [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23, 543 – 568.
- [17] 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.
- [18] Mónica Sánchez-Román¹, Crisógono Vasconcelos¹, Thomas Schmid, et al. Aerobic microbial dolomite at the nanometer scale: Implications for the geologic record [J]. *Geology*, 2008, 36 (11): 879 – 882.
- [19] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (11): 1657.
- [20] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- Sichuan oil and gas field Drafting group of *Petroleum Geology of China*. *Petroleum Geology of China* (volume 10) [M]. Beijing: Publishing House of Oil Industry, 1991.
- [21] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 113 – 138.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. Formation and evolution of Sichuan basin [M]. Beijing: Publishing House of Oil Industry, 1996: 113 – 138.
- [22] 黄先平, 杨天泉, 张红梅. 四川盆地二叠统沉积相及其勘探潜力区研究 [J]. *天然气工业*, 2004, 24 (1): 10 – 12.
- Huang Xianping, Yang Tianquan, Zhang Hongmei. Research on the sedimentary facies and exploration potential areas of lower permian in sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24 (1): 10 – 12.
- [23] 石新, 王兴志, 张帆, 等. 川西北地区栖霞组白云岩储集层研究 [J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27 (2): 13 – 16.
- Shi Xin, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. The study of dolomite reservoirs of Qixia Formation in northwest of Sichuan basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27 (2): 13 – 16.
- [24] 陈更生, 岳宏. 四川盆地川西南地区下二叠统气藏类型及有效缝洞分布规律 [J]. *天然气工业*, 1995, (06): 10 – 13.
- Chen Gengsheng, Yue Hong. Gas reservoir types and effective fracture-vug distribution law of lower Permian series in the southwest area of Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 1995, (06): 10 – 13.
- [25] 陆正元. 四川盆地二叠统高自然伽马溶洞储层 [J]. *石油学报*, 1999 (5): 24 – 26.
- Lu Zhengyuan. High GR ray Karsts reservoir of low Permian in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999 (5): 24 – 26.
- [26] 曹刚, 李其荣, 安辉. 川南地区下二叠统茅口组“岩溶型气藏”地震、地质特征探讨 [J]. *天然气地球科学*, 1999 (3 – 4): 76 – 81.
- Cao Gang, Li Qirong, An Hui. “Karst reservoir” seismic and geological character of Maokou group of low Permian in sichuan south area [J]. *Nature Gas GeoScience*, 1999 (3 – 4): 76 – 81.
- [27] 陈宗清. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探 [J]. *中国石油勘探*, 2007, No. 52 (05): 1 – 11.
- Chen Zongqing. Exploration for natural gas in Middle Permian Maokou Formation of Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, No. 52 (05): 1 – 11.
- [28] 颜其彬, 庞雯. 川南茅口灰岩岩溶特征与油气关系 [J]. *西南石油学院学报*, 1993, 27 (03): 11 – 16.
- Yan Qibin, Pang Wen. Relationship between oil/gas accumulation and Karst feature of Maokou formation in Luzhou area, Sichuan [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1993, 27 (03): 11 – 16.
- [29] 陈宗清. 川西南地区二、三叠系碳酸盐岩断裂带缝气藏 [J]. *石油学报*, 1995, 26 (03): 37 – 43.
- Chen Zhongqing. Fractured gas pools in Permian and Triassic carbonate rock faulted zone of south-west Sichuan region [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 26 (03): 37 – 43.
- [30] 宋章强, 王兴志, 曾德铭. 川西北二叠纪栖霞组沉积相及其与油气的关系 [J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27 (6): 20 – 24.
- Song Zhangqiang, Wang Xingzhi, Zeng Deming. The study of dolomite reservoirs in qixia formation in the northwest region of sichuan [J]. *Journal of Southwest petroleum institute*, 2005, 27 (6): 20 – 24.
- [31] 陈明启. 川西南中二叠统白云岩成因探讨 [J]. *沉积学报*, 1989, 7 (2): 45 – 50.
- Chen Mingqi. A discussion of the origin of Yangxin dolomite of Lower Permian in southwest Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7 (2): 45 – 50.
- [32] 何幼斌, 冯增昭. 四川盆地及其周缘中二叠统细—粗晶白云岩成因探讨 [J]. *江汉石油学院学报*, 1996, 18 (4): 5 – 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): 5 – 20.
- [33] 王运生, 金以钟. 四川盆地中二叠统白云岩及古岩溶的形成与峨眉地裂运动的关 [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.
- [34] 袁浩, 尹富平, 杨威, 等. 川西北地区中二叠统栖霞组白云岩分布与成因探讨 [J]. *四川地质学报*, 2010, 30 (4): 385 – 389.
- Yuan Hao, Yin Fuping, Yang Wei, et al. An approach to distribution and genesis of dolomite of the lower Permian Qixia formation In Northwest Sichuan [J]. *Acta Geological Sichuan*, 2010, 30 (4): 385 – 389.
- [35] 王丹, 袁苗, 段文浩, 等. 川西北中二叠统栖霞组白云岩成因探讨 [J]. *石油天然气学报*, 2011, 33 (6): 46 – 49.
- Wang Dan, Yuan Miao, Duan Wenhao, et al. Discussion of dolomite genesis of the lower Permian Qixia formation in northwest of Sichuan Basin [J]. *Journal of Oil and Gas*, 2011, 33 (6): 46 – 49.
- [36] 金振奎, 冯增昭. 滇东—川西中二叠统白云岩的形成机理—玄武岩淋滤白云化 [J]. *沉积学报*, 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.
- [37] 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, 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 – 448, 458.
- [38] Anderson T F, Arthur M A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems (in *Stable isotopes in sedimentary geology*) [J]. *SEPM Short Course*, 1983, 10 1. 1 – 1. 151.
- [39] Clayton R N. Oxygen isotope composition of the Luna 16 soil [J]. 1972, 13 (2): 455 – 456.
- [40] Palmer M R, Elderfield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr [J]. *Nature*, 1985, 314: 526 – 528.
- [41] Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Mississippian, Pennsylvanian and Permian seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve [J]. *Chemistry Geology*, 1994, 112: 145 – 167.
- [42] Derry L A, Keto L S, Jacobsen S B, et al. Sr isotope variations in Upper Proterozoic carbonates from Svalbard and East Greenland [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 2331 – 2339.