

文章编号:0253-9985(2012)03-0442-07

四川盆地北部栖霞组-茅口组热液白云岩特征与成因

舒晓辉¹,张军涛²,李国蓉³,龙胜祥²,吴世祥²,李宏涛²

(1. 中国石化 办公厅,北京 100728; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083; 3. 成都理工大学,四川 成都 610059)

摘要:以四川盆地北部广元峡沟煤矿剖面白云岩为研究对象,剖面由下部地层向上,白云岩化程度逐渐增强,颜色由深到浅,岩性由生屑灰岩逐渐过渡到斑状白云岩,然后再到中-粗晶白云岩,上部覆盖茅口组泥灰(云)岩。中-粗晶白云岩发育于栖霞组顶部和茅口组底部,由中晶到粗晶的半自形-自形白云石组成,其中可见鞍状白云石。岩石中溶蚀孔洞发育,孔隙内有沥青充填。微晶灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值为3.23‰, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值为-5.03‰;白云石样品的碳、氧同位素具有一定的差异, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值为3.29‰~4.14‰, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值为-6.07‰~-6.75‰。流体来源可能为岩浆热液,或者是经历了深循环的大气降水。在断裂活动时,深部热液流体沿断裂向上运移,当运移到栖霞组和茅口组时,由于吴家坪组泥灰岩和泥云岩的封堵,流体的运移被减缓甚至停滞,促使围岩发生白云岩化,溶蚀作用也同时发生,产生溶蚀孔隙。由此,在栖霞组顶部和茅口组底部可能形成热液白云岩储层,该储层具有一定的储集意义。

关键词:热液白云岩;溶蚀孔隙;断裂;油气储层;中二叠统;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin

Shu Xiaohui¹, Zhang Juntao², Li Guorong³, Long Shengxiang², Wu Shixiang² and Li Hongtao²

(1. General Office, China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 2. SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Taking outcrop dolomites in Guangyuan Xiagou coal mine in northern Sichuan Basin as an example, this paper studies the characteristics and genesis of hydrothermal dolomite reservoir. From the bottom to the top of the outcrop cross section, the dolomitization gradually enhances; the color of rocks changes from dark to light; the lithologies change from bioclastic limestones to patchy dolostones, then to medium- and coarse-grained dolomites, and end up with the Maokou Formation marlstones. The medium- to coarse-grained dolomites occur at the top of the Qixia Formation and the bottom of the Maokou Formation, and are composed of medium- to coarse-grained subhedral or euhedral dolomites and some saddle-like dolomites. Dissolved caverns and pores are well-developed and filled with asphalt. The $\delta^{13}\text{C}$ value (PDB) and $\delta^{18}\text{O}$ value (PDB) of micritic limestones are 3.23‰ and -5.03‰, respectively. The $\delta^{13}\text{C}$ value (PDB) and $\delta^{18}\text{O}$ value (PDB) of the dolomites are 3.29 ~ 4.14‰ and -6.07 ~ -6.75‰ respectively. Fluids may be sourced from magmatic hydrothermal fluid, or meteoric water experiencing deep circulation. The deep hydrothermal fluids migrated up along open faults and slowed down or even stopped when arriving at the Qixia and Maokou Formations due to the sealing of marl and pelitic dolostones in the Wujiaping Formation. The stagnant thermal fluids caused dolomitization dissolution of the surrounding rocks. Therefore, it is possible that hydrothermal dolomite reservoirs occur at the top of Qixia Formation and the bottom of Maokou Formation.

Key words: hydrothermal dolomite, dissolution pore, fracture, reservoir, Middle Permian, Sichuan Basin

收稿日期:2012-03-03。

第一作者简介:舒晓辉(1971—),男,硕士、高级工程师,油气田开发地质。

基金项目:国家基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB214802);国家科技重大专项(2011ZX05005002)。

热液白云岩作为一种特殊的白云岩类型,备受关注^[1],又因其形成过程中通常伴有热水溶蚀发生^[2],可形成优质油气储层,近来也成为石油地质学研究的一个热点^[3]。

中二叠统在四川盆地部分区域发育有一定规模的白云岩化,但发育程度又非常不均一。川西地区中二叠统钻井5口,遇白云岩有4口井,其中获工业气井、小气井和气测异常井各1口;川中女基井栖霞组钻遇中-粗晶白云岩11.5 m。前人对成因已有了初步探索,关于其成因有很大的争议,典型研究如:峨眉、汉旺及宝兴一带白云岩形成于海水、淡水混合作用,继后又受地壳升降、褶皱、火山等影响,是多期成岩作用叠加的产物^[4];华蓥山灰岩中的透镜状、团块状白云岩是来自玄武岩风化所产生的富Mg水及岩浆残余水经构造活动,对周围石灰岩交代或结晶的产物^[5];盆地及其周缘地区发育的细晶至粗晶白云岩和白云质灰岩主要是由埋藏白云石化作用形成的^[6];川西南一带次生白云岩属埋藏热液成因,而在其以东的广大地区则以混合水成因为主^[7];滇东-川西地区分块状白云岩和斑状白云岩两种白云岩类型,都形成于“玄武岩淋滤白云化”,即白云岩是在埋藏

环境中较高温度条件下形成的,白云岩化流体来自淋滤峨眉山玄武岩的大气降水,Mg来自玄武岩中铁镁矿物的风化分解^[8]。前人研究表明,四川盆地中二叠统白云岩可能形成于埋藏期,但白云岩化流体性质与白云岩化模式仍存在争议,其储集意义仍缺乏充分研究。因而,研究四川盆地中二叠统发育的白云岩,可以为热液白云岩这一研究热点与难点提供新的制约,并可探索其在四川盆地的储集意义。

1 岩石学特征

研究区位于四川盆地北部广元的峡沟煤矿剖面的中二叠统栖霞组(P_2q)与茅口组(P_2m)中(图1)。野外产状上,由下部地层向上,白云岩化程度逐渐增强(图2)。颜色由深到浅,从深灰色到灰色。岩性由生屑灰岩(图3a)逐渐过渡到斑状白云岩(图3b),然后再到中-粗晶白云岩(图3c)。白云岩纵向上厚度在100 m左右,横向展布受现今的峡沟控制,但范围未知,上部覆盖茅口组泥灰(云)岩,其中并见有一套辉绿岩侵入体(图3d)。

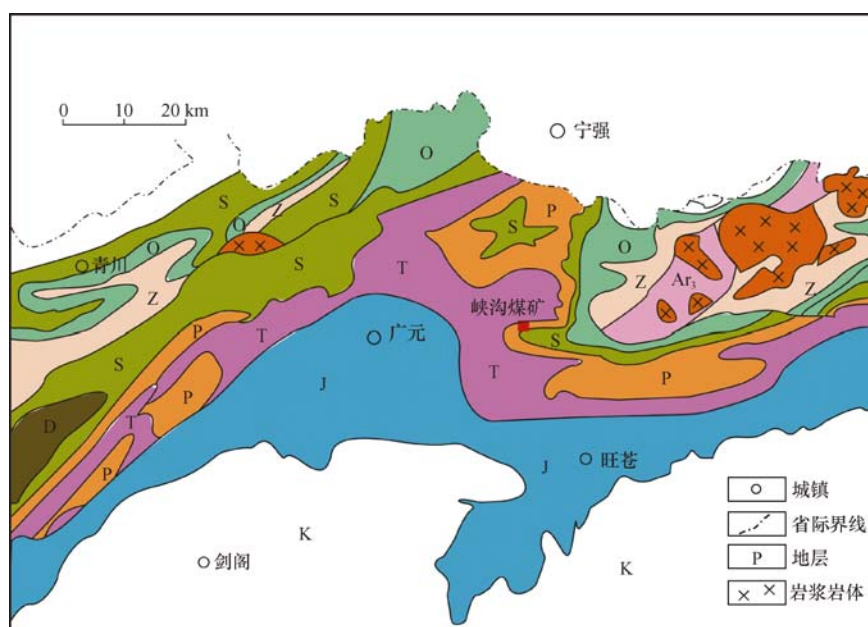


图1 四川盆地北部地质简图

Fig. 1 Geological map of northern Sichuan Basin
(红色方块为剖面位置。)

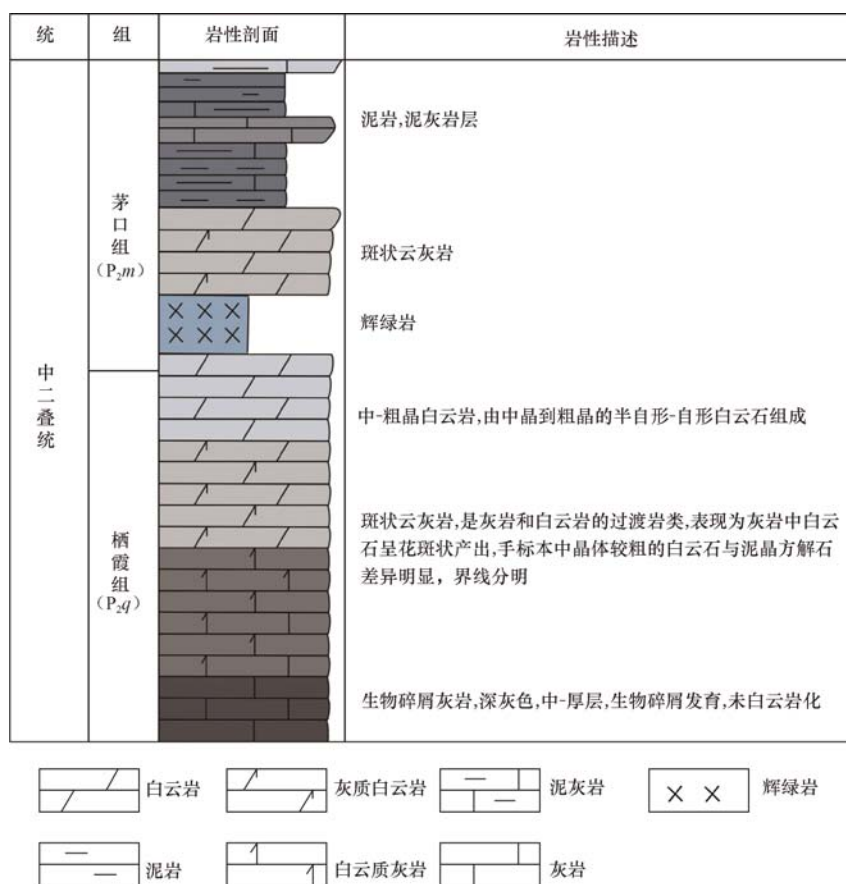


图2 川北广元峡沟煤矿剖面栖霞组-茅口组岩性剖面

Fig. 2 Lithology column of the Qixia-Maokou Formations on Xiagou coal mine outcrop in northern Sichuan Basin

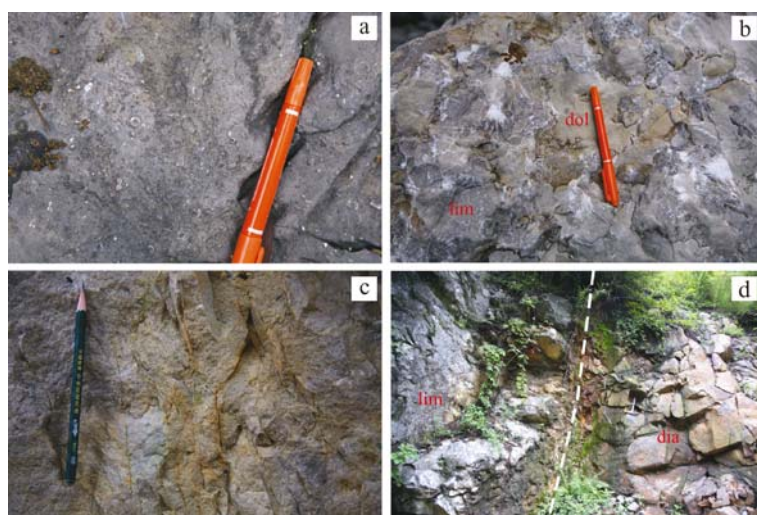


图3 川北中二叠统热液白云岩野外特征

Fig. 3 Outcrop characteristics of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in northern Sichuan Basin

- a. 深灰色生物碎屑灰岩, 栖霞组, 峡沟煤矿; b. 斑状云灰岩, 栖霞组, 峡沟煤矿;
c. 中-粗白云岩; d. 辉绿岩侵入体, 茅口组, 峡沟煤矿
lim. 灰岩; dol. 白云岩; dia. 辉绿岩

1.1 生物碎屑灰岩

这是栖霞组中原始未经蚀变的基质岩石。该岩类深灰色,中-厚层,生物碎屑发育,富含腹足类、头足类、有孔虫、棘皮类和珊瑚等生物化石;生屑多为亮晶方解石,粒间为泥晶胶结,未见白云岩化,但常见有泥质夹层,各种孔隙均不发育(图4a)。

1.2 斑状云灰岩

这是灰岩和白云岩的过渡岩类。该岩类发育栖霞组中、上部和茅口组的底部,表现为灰岩中白云石呈花斑状产出,手标本中晶体较粗的白云石与泥晶方解石差异明显、界线分明;其中斑块内的白云石多为半自形-自形中晶-粗晶,可见有少量的鞍状白云石。生屑灰岩原岩中泥晶胶结物易于白云岩化,而生屑较难以白云岩化,呈残余产出。斑状云灰岩晶间孔、溶孔、裂隙和缝合线发育,白云石晶间可见有灰岩的残余(图4b)。

1.3 中-粗晶白云岩

该岩类发育于栖霞组顶部,由中晶到粗晶的半自形-自形白云石组成,多为镶嵌接触,并可见

鞍状白云石;鞍状白云石表现为粗大的晶体,弯曲的晶面,雾心亮边,正交光下波状消光,基本不见灰岩残余,溶孔发育(图4c)。

1.4 辉绿岩

该岩类见于茅口组地层中,呈岩体产出,镜下具有明显的辉绿结构,即辉石的平均粒径大于斜长石平均长度,呈现板条状斜长石组成的格架内填充一粒或几粒与其大小相当的辉石。辉绿岩是典型的浅层侵入岩(图4d)。

2 岩石储集空间

在川北广元峡沟煤矿的野外剖面中,热液白云岩中孔隙非常发育。其中,主要的孔隙类型有溶孔溶洞、晶间孔隙和裂缝三大类。

2.1 溶孔溶洞

该类孔隙集中于栖霞组的顶部,在中-粗晶白云岩中尤为发育。最大的溶洞直径可达十几厘米,呈椭圆形,孔隙边缘充填有少量的鞍状白云石、方解石以及沥青等。溶孔溶洞是本区热液白云岩中最重要的储集空间。

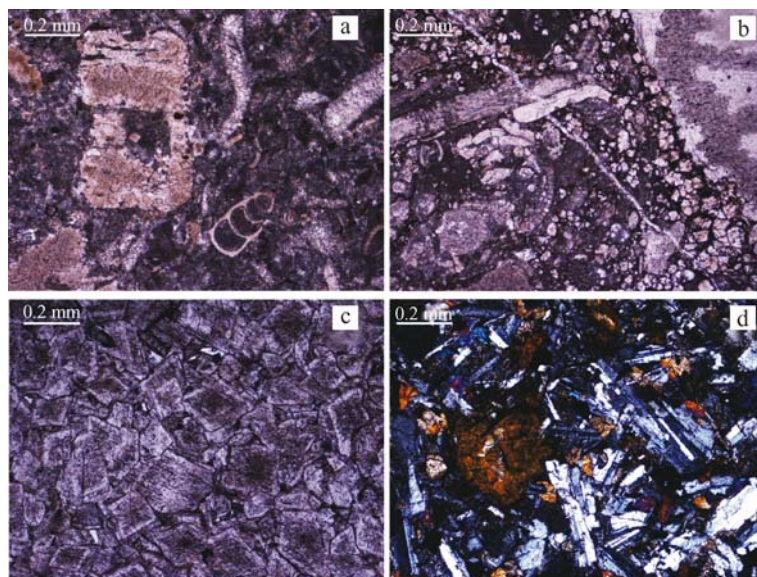


图4 川北中二叠统岩石显微特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of rocks of the Middle Permian in northern Sichuan Basin

- a. 生屑灰岩,生屑有腹足类和棘皮类等,粒间泥晶胶结,栖霞组,峡沟煤矿,单偏光;b. 斑状云灰岩,不均一白云岩化,泥晶白云岩化,生屑未白云岩化,白云石自形-半自形,栖霞组,峡沟煤矿,单偏光;c. 中-粗晶白云岩,白云石自形,具有雾心亮边结构,晶间孔发育,栖霞组,峡沟煤矿,单偏光;d. 辉绿岩,辉石与斜长石呈辉绿结构,茅口组,峡沟煤矿,正交光

2.2 晶间孔隙

该类孔隙发育在中-粗晶白云岩和花斑状白云岩中。在一些中-粗晶白云岩中,一些晶间孔隙由于沥青的充填而呈花斑状。晶间孔隙常与溶孔、裂缝相伴生,多有沥青充填,是本区重要的储集空间。

2.3 裂缝

该类孔隙发育在峡沟煤矿栖霞组的各类岩石中,特别是在溶孔发育的部位,呈网状发育,其中多为沥青充填,也有部分为方解石充填。

3 白云岩形成条件

3.1 沉积环境

四川盆地中二叠统属于开阔台地碳酸盐岩沉积^[9-11]。在川北的广元地区,栖霞组-茅口组为生屑滩沉积环境,中二叠统不具有沉积生成白云岩化的环境。由此可以初步推测,其白云岩可能是埋藏期形成的。

3.2 白云岩化作用

川北地区栖霞组沉积时期的沉积环境不具备发生大规模白云岩化的条件;同时,白云岩的岩石学特征也显示本区的白云岩并非是在同生或准同生期形成的。因此,其很可能形成于埋藏条件下。

本区白云岩的主要组成矿物为中-粗晶白云石(图4b,c),不同于准同生期白云岩的粉-细晶白云石,反映了其形成于埋藏环境下,或者早期形成后经历了后期的重结晶作用改造。另外,云灰岩中花斑状白云岩化,并呈现出泥晶胶结物白云岩化、生屑未白云岩化的选择性的白云岩化特征(图4c),这是埋藏期白云岩化的典型特征。

此外,鞍状白云石的存在也是埋藏条件下白云岩化的标志之一。鞍状白云石在本区多以孔隙充填物的形式存在(图5),也常见于白云岩基质中(图4c)。鞍状白云石晶体巨大,一般为粗晶,甚至巨晶,晶面弯曲,呈马鞍状,常具有雾心亮边,

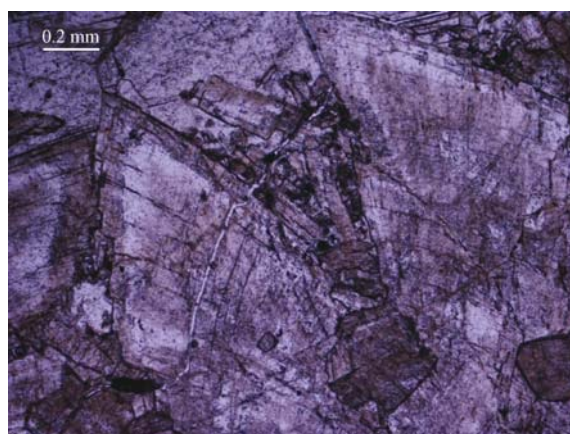


图5 川北中二叠统热液白云岩中的鞍状白云石

Fig. 5 Saddle-like dolomites in hydrothermal dolostones of the Middle Permian in northern Sichuan Basin

(鞍状白云石晶体巨大,一般为粗晶,甚至巨晶,晶面弯曲,呈马鞍状,常具有雾心亮边,峡沟煤矿剖面。)

在正交光下呈波状消光。一般认为,鞍状白云石多形成于80~160℃,高盐度的流体中,为低温热液矿物,其特殊的晶体形态是快速结晶的结果。

本区白云岩的地球化学特征也显示,其形成于热液环境中。通过碳、氧同位素分析可以初步厘定白云岩化流体的性质。一个栖霞组微晶灰岩的碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)为3.23‰,氧同位素值 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)为-5.03‰(表1;图6)。白云石样品的碳、氧同位素具有一定的差异,但明显低于灰岩样品的值, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值为3.29‰~4.14‰, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值为-6.07‰~-6.75‰(表1;图6)。两者间碳同位素的值相近,反映了其具有相似的碳来源,应该为交代作用形成的;白云岩中偏负的氧同位素值则说明,其形成于相对较高的高温流体中,有可能是岩浆热液,也有可能是经历了深循环的大气降水,在循环过程中与围岩发生了充分的分馏,使得具有了相近的碳、氧同位素特征。而后期方解石充填物的碳、氧同位素变化较大, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)值从0.43‰到5.17‰, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值从-10.72‰到-1.95‰(表1;图6)。这些差异反映了流体来源的多样性,既有早期海水胶结的产物,与灰岩值相近,又有与白云岩同源的流体,与白云岩值相近,也存在有后期大气降水的产物。

表1 川北中二叠统白云岩碳、氧同位素数据

Table 1 Carbon and oxygen isotope data of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in northern Sichuan Basin

样号	岩性	取样位置	层位	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})/\text{‰}$
425	构造裂缝内方解石	峡沟煤矿	P_2q	2.52	-8.33
429	含生屑微晶灰岩	峡沟煤矿	P_2q	3.23	-5.03
433	构造裂缝内方解石	峡沟煤矿	P_2q	2.71	-6.69
435	生屑灰岩中细-粉晶结构白云石斑块	峡沟煤矿	P_2q	4.68	-5.50
443	大型溶洞内方解石	峡沟煤矿	P_2q	0.43	-4.98
453	溶蚀孔洞边缘异形白云石	峡沟煤矿	P_2q	2.95	-5.22
455a	不规则缝洞内方解石	峡沟煤矿	P_2q	1.44	-10.72
1000	中晶白云石	峡沟煤矿	P_2q	3.29	-6.11
1001	细晶白云石	峡沟煤矿	P_2q	3.64	-6.07
466a	细晶白云岩(浅)	峡沟煤矿	P_2m	3.56	-6.71
466b	细晶白云岩(暗)	峡沟煤矿	P_2m	3.75	-6.74
469	不规则裂缝内方解石	峡沟煤矿	P_2m	3.33	-6.72
473	不规则缝洞内方解石	峡沟煤矿	P_2m	4.14	-6.21
475a	细晶白云岩	峡沟煤矿	P_2m	2.78	-1.95
475b	细晶白云岩构造裂缝内方解石	峡沟煤矿	P_2m	3.28	-8.26
481	不规则缝洞内方解石	峡沟煤矿	P_2m	3.60	-6.48
492	不规则缝洞内方解石	峡沟煤矿	P_2m	5.17	-5.50

注: P_2q 为中二叠统栖霞组; P_2m 为中二叠统茅口组。

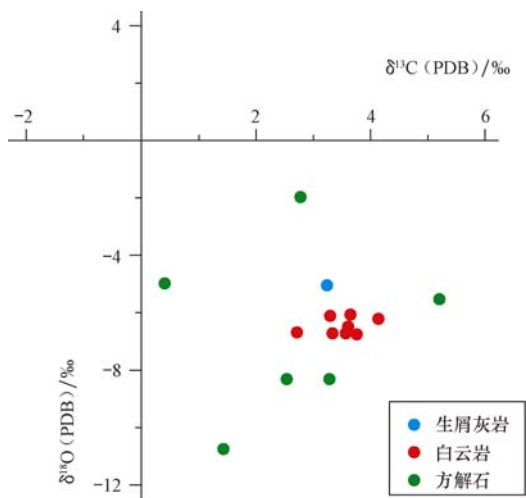


图6 川北中二叠统白云岩碳、氧同位素交会图

Fig. 6 Cross-plot of carbon and oxygen isotopes of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in northern Sichuan Basin

白云岩有序度用其(015)和(010)两个晶面衍射峰的峰强度比 I_{015}/I_{010} 或峰高比 h_{015}/h_{010} 来进行表征。本区白云岩的有序度相对较低,花斑状云灰岩中白云石有序度最低值仅为0.50,在细晶白云岩中最高为0.80(表2),且晶体越粗有序度越低,说明白云岩形成时结晶速度较快,反映了白云

岩为热液环境的产物,是典型的热液白云岩。
综合分析认为,白云岩为热液白云岩化作用形成,但热液很可能是岩浆热液,也有可能是来源于深层的热卤水或深循环的大气降水。

4 白云岩储层形成模式

热液白云岩以较大溶蚀孔隙(一般可见溶蚀扩大缝)、中-粗晶白云岩以及溶蚀孔隙内有少量的鞍状白云石充填物为特征。对于其形成模式,国内外已有了较为详尽的阐述。其一般受断层控制,溶蚀一般发生在断裂破碎强烈处或流体运移遇到堵塞的区域。除了热液白云岩化外,断裂和封盖层是其形成的另外两个条件^[12](图7)。

碳酸盐岩热溶蚀并非越热越容易溶解。白云石在水中的溶解度极小,而 H_2S 和 CO_2 可能是碳酸盐最为重要的溶解介质^[13]。但是, H_2S 和 CO_2 都是中性气体,如果不溶解于水,其化学反应能力很弱,而且这两种气体在水中的溶解度都是随温度的增加而降低的。因而, H_2S 和 CO_2 在深埋藏的高温条件下都更趋向于以气体形式存在;在相对低温条件下, H_2S 和 CO_2 对碳酸盐矿物的溶解能力反而较强。这就是所谓的低温倒退溶解模

表2 川北中二叠统白云岩有序度数据

Table 2 Degree of order of hydrothermal dolomites in the Middle Permian in northern Sichuan Basin

样号	岩性	取样位置	层位	h_{015}/h_{010}	I_{015}/I_{010}
435	细晶白云石斑块	峡沟煤矿	P ₂ q	0.64	0.60
440	细晶白云岩	峡沟煤矿	P ₂ q	0.67	0.78
448	中晶白云岩	峡沟煤矿	P ₂ q	0.58	0.68
455	中-细晶白云石斑块	峡沟煤矿	P ₂ q	0.52	0.50
466	细晶白云岩	峡沟煤矿	P ₂ m	0.76	0.82

注:P₂q 为中二叠统栖霞组;P₂m 为中二叠统茅口组。

h_{015}/h_{010} 和 I_{015}/I_{010} 分别为白云岩(015)和(010)两个晶面衍射峰的峰高比和峰强度比。

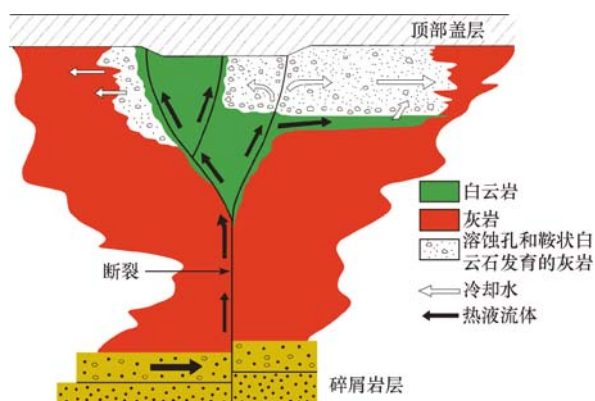
图7 热液溶蚀改造模型(Esteban 和 Taberner,2003)^[12]

Fig. 7 Model of hydrothermal dissolution

(Esteban and Taberner,2003)^[12]

式,即冷却水溶蚀模式。碳酸盐溶解需要热流体冷却的过程,造成这种冷却的一个重要地质过程就是断裂活动引起的向上运移的热流体^[14-15]。

断裂活动是发生热溶蚀的关键。以断裂为通道,热流体可通过冷却、混合等多种模式对白云岩溶蚀,形成溶蚀孔隙。在中二叠统沉积以后,四川盆地经历了多期次的构造活动^[16],为热液白云岩的形成提供了条件。结合川北的地质背景,可以建立起储层形成模式:在断裂活动时,深部热液流体沿断裂向上运移,当运移到栖霞组顶部时,由于茅口组和吴家坪组泥灰岩和泥云岩的封堵,流体的运移被减缓甚至停滞,促使围岩发生白云岩化^[17],溶蚀作用也同时发生,产生溶蚀孔隙,从而在栖霞组顶部和茅口组底部形成热液白云岩储层。因此,在四川盆地中二叠统地层中可能发育有此类热液白云岩储层,具有一定的勘探前景^[18]。

参 考 文 献

- [1] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [A]. The geometry and petrogenesis of dolomite hy-

drocarbon reservoirs [C]. Geological Society Special Publications, 2004, 235: 7-63.

- [2] Lavoie D, Morin C. Hydrothermal dolomitization in the Lower Silurian Sayabec Formation in northern Gaspé-Matapédia (Québec): constraint on timing of porosity and regional significance for hydrocarbon reservoirs [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2004, 52(3): 256-269.
- [3] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [4] 陈明启. 川西南下二叠统新白云岩成因探讨 [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.
- [5] 李茂竹, 王玉英. 四川华蓥山中段下二叠统灰岩中“砂糖状白云岩”特征及其白云化作用的讨论 [J]. 川煤地勘, 1991, 9(1): 45-48.
Li Maozhu, Wang Yuying. Character and origin of saccharoidal dolomite in Lower Permian limestone in middle Huayinshan mountain, Sichuan basin [J]. Sichuan Coal Exploration, 1991, 9(1): 45-48.
- [6] 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): 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.
- [7] 王运生, 金以钟. 四川盆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 relation to the Emei taphrogenesis [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997, 24(1): 8-16.
- [8] 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.

(下转第458页)

- 36-3构造古近系沙二段储集层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 832-838.
- Liu Zhigang, Zhou Xinhui, Li Jianping, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of the Paleogene Sha-2 member in 36-3 structure, Eastern Shijiutuo uplift, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 832-838.
- [13] 纪友亮, 周勇, 王改为, 等. 下扬子地区古生界海相碳酸盐岩层序地层发育模式及储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 724-732.
- Ji Youliang, Zhou Yong, Wang Gaiwei, et al. Sequence stratigraphic models and reservoir prediction of the Paleozoic marine carbonates in the Lower Yangtze area[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 724-732.
- [14] 陈昭佑, 王光强. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山西组砂体组合类型及成因模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 632-639.
- Chen Zhaoyou, Wang Guangqiang. Assemblage types and genetic models of the Shanxi sandbodies in Daniudi gasfield, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 632-639.

(编辑 张亚雄)

(上接第448页)

- Jin Zhenkui, Feng Zengzhao. Origin of dolostones of the Lower Permian in East Yunnan-West Sichuan—dolomitization through leaching of basalts [J]. Acta Sedimentology Sinica, 1999, 17(3): 383-389.
- [9] 王宓君, 包茨, 肖明德, 等. 中国石油地质志(卷十): 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 1-151.
- Wang Bijun, Bao Ci, Xiao Mingde, et al. Petroleum geology of China (V10): Sichuan region [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 1-151.
- [10] 李嵘, 张娣, 朱丽霞. 四川盆地川西坳陷须家河组砂岩致密化研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 274-281.
- Li Rong, Zhang Di, Zhu Lixia. Densification of Upper Triassic Xujiahe tight sandstones, Western Sichuan, China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 274-281.
- [11] 譙述蓉, 赵爽, 谢雄光. 川西 MJ 地区蓬莱镇组储层含气性识别模式研究[J]. 石油物探, 2011, 50(4): 386-392.
- Qiao Shurong, Zhao Shuang, Xie Xionggang. Research on the gas-bearing identification patterns of Penglaizhen Formation in MJ area, Western Sichuan Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(4): 386-392.
- [12] Esteban M, Taberner C. Secondary porosity development during late burial in carbonate reservoirs as a result of mixing and/or cooling of brines [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78-79(1-3): 355-359.
- [13] 黄思静, 王春梅. 碳酸盐成岩作用的研究前沿和值得思考的问题[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(1): 1-10.
- Huang Sijing, Wang Chunmei. Scientific research frontiers and considerable questions of carbonate diagenesis [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(1): 1-10.
- [14] 张军涛, 胡文瑄. 塔里木盆地中央隆起区上寒武统一下奥陶统白云岩储层中两类白云石充填物: 特征与成因[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 957-966.
- Zhang Juntao, Hu Wenxuan. Feature and origin of dolomite filling in the Upper Cambrian-Lower Ordovician dolostone of the central uplift, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentology Sinica, 2008, 26(6): 957-966.
- [15] Zhang Juntao, Hu Wenxuan. Formation of saddle dolomites in Upper Cambrian carbonates, western Tarim Basin, (NW China): implication for fault-controlled fluid flow events [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1428-1440.
- [16] 魏国齐, 杨威, 朱永刚, 等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442-448.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Zhu Yonggang, et al. Depositional system of the Middle Permian Qixia Formation in the western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 442-448.
- [17] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 810-818.
- Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 810-818.
- [18] 何治亮, 魏修成, 钱一雄, 等. 海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 489-498.
- He Zhiliang, Wei Xiucheng, Qian Yixiong, et al. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 489-498.

(编辑 李 军)