

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段富铁白云石成因

张军涛¹,何治亮¹,岳小娟²,孙宜朴¹,金晓辉¹,陈霞¹

[1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249]

摘要:鄂尔多斯盆地马家沟组五段白云岩,按照晶粒可分为两种类型:晶粒较细的M型微晶白云岩和晶粒相对较粗的F型粉细晶白云岩。这两类白云岩都具有较高的Fe含量,但Fe并不是均一分布的。在M型微晶白云岩中,基质白云石的铁含量为 $583 \times 10^{-6} \sim 3\,811 \times 10^{-6}$,富铁白云石主要以膏溶铸模孔的孔隙充填物的形式存在,粗晶白云石充填物铁含量 $29\,112 \times 10^{-6} \sim 47\,148 \times 10^{-6}$,均匀分布于晶体之中;而粉晶白云石充填物,铁含量最可达 $81\,752 \times 10^{-6}$,仅富集于白云石的边缘。在F型粉-细晶白云岩中,其基质白云石的铁含量为 $233 \times 10^{-6} \sim 2\,007 \times 10^{-6}$;裂缝和孔隙内充填的白云石的铁含量较高,可达 $9\,178 \times 10^{-6}$,均匀分布。铁的富集可能与孔隙的发育有一定联系。孔隙越发育,容易富集铁。M型微晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ 值为 $-3.5\% \sim 1.4\%$, $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ 值为 $-6.5\% \sim -8.0\%$;孔隙充填物粉晶白云石 $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ 值为 $-0.7\% \sim -2.7\%$, $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ 值在 $-9.8\% \sim -11.5\%$;粗晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ 值范围为 $-1.7\% \sim -2.9\%$, $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ 值范围为 $-9.9\% \sim -11.3\%$,可能受到过较高温度流体的影响。F型粉细晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ 值为 $-0.4\% \sim -0.8\%$, $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ 值为 $-5.3\% \sim -6.6\%$,与海水较为接近。两类白云岩的Fe可能来源于上覆的铁质粘土岩。白云岩形成后,后经历了漫长的风化暴露剥蚀,形成了大量的储集空间,并残存形成了上覆铁质粘土岩。当再次进入埋藏期后,铁质粘土岩中富铁的流体在重力的作用下,向下部的地层运移,且到一定深度时,氧化态 Fe^{3+} 转化为还原态的 Fe^{2+} ,且已具有相对较高的地温,使得 Fe^{2+} 更容易进入白云石晶格,形成了富铁的白云岩层系。

关键词:孔隙;富铁白云岩;马家沟组;奥陶系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Genesis of iron-rich dolostones in the 5th member of the Majiagou Formation of the Ordovician in Ordos Basin

Zhang Juntao¹, He Zhiliang¹, Yue Xiaojuan², Sun Yipu¹, Jin Xiaohui¹, Chen Xia¹[1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*2. *School of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China]*

Abstract: According to the crystalline form and size, dolostones from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, can be divided into two types: M-type microcrystalline dolostone and F-type silt-to-fine-sized crystalline dolostone. Both types have a high Fe content. However, Fe is not uniformly distributed in the two types of dolostones. In the M-type dolostone, the matrix dolomite has a Fe content of 583×10^{-6} to $3\,811 \times 10^{-6}$ and the iron-rich dolomite mainly occurs as filling material in dissolved mold pores, the coarse crystalline pore-filling dolomites have a Fe content of $29\,112 \times 10^{-6}$ to $47\,148 \times 10^{-6}$ and the Fe is evenly distributed in the crystalline, and the silt-sized crystalline pore-filling dolomites have a Fe content up to $81\,752 \times 10^{-6}$, and the Fe concentrate only at the edge of the dolomites. In the F-type dolostones, the matrix has a Fe content of 233×10^{-6} to $2\,007 \times 10^{-6}$, dolomites filled up fractures and pores have an evenly distributed Fe with a content up to $9\,178 \times 10^{-6}$. There might be a correlation between the Fe enrichment and pore development. Well-developed pores generally mean higher concentration of Fe. The value ranges of $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ and $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ of the M-type microcrystalline dolomites are -3.5% to 1.4% and -6.5% to -8.0% , respectively. Those of silt-sized crystalline pore-filling dolomites are -0.7% to -2.7% and -9.8% to -11.5% , and those of coarse crystalline pore-filling dolomites are -1.7% to -2.9% and -9.9% to -11.3% , indicating possible influences of hydrothermal fluids. The value ranges of $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ and $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ of the F-type are -0.4% to

收稿日期:2016-08-15;修订日期:2017-07-05。

第一作者简介:张军涛(1981—),男,高级工程师,碳酸盐岩储层。E-mail: zhangjt.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(U1663209);国家科技重大专项(2016ZX05005);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDAXX010200)。

-0.8‰ and -5.3‰ to -6.6‰. The two types may have their Fe derived from the overlying ferruginous clay rocks. After long exposure to weathering and erosion, the dolomites harbored a large number of pores with some residual overburden of ferruginous clay rocks, from which Fe-rich fluids migrated downward by gravity during burial process, and Fe^{3+} was transformed into Fe^{2+} when the fluid reaches a certain temperature and depth making it easier for Fe^{2+} to enter into dolomite lattice and forming iron-rich dolomites.

Key words: pore, iron-rich dolomite, Majiagou Formation, Ordovician, Ordos Basin

白云岩在形成和成岩演化过程中,容易受到各种流体的改造和影响,发生各种变化^[1-3]。由于 Fe 离子和 Mg 离子、Ca 离子的半径较为接近,所以流体中的 Fe 进入白云石变得可能^[4-6]。白云石中 Fe 含量往往能反映流体的性质,学者也多利用白云石中的 Fe 含量来分析流体的性质。

前人的诸多研究都显示,鄂尔多斯盆地不同地区马家沟组马五段的白云岩都具有较高的 Fe 含量,中部奥陶系马五段 Fe 含量平均可达 $3\,040 \times 10^{-6}$ ^[7],中东部陕 8 井中 Fe 含量为 $5\,720 \times 10^{-6}$ ^[8],龙探 1 井中 Fe 的含量一般为 $5\,000 \times 10^{-6} \sim 25\,000 \times 10^{-6}$ ^[9],中南部 Fe 含量值平均值为 $5\,599 \times 10^{-6}$ ^[10]。

孔隙的发育程度与 Fe 含量也有一定的对应关系,泥晶白云石基质中 Fe 含量平均值为 $1\,673 \times 10^{-6}$;孔隙内充填白云石中 Fe 含量可达 $23\,005 \times 10^{-6}$ ^[11]。靖边气田马五 1—马五 4 亚段白云岩中 Fe 含量平均为 $11\,617.2 \times 10^{-6}$,其中孔隙发育的白云岩具有较高的铁含量($2\,345.6 \times 10^{-6} \sim 11\,255.60 \times 10^{-6}$),而孔隙不发育的白云岩 Fe 含量相对较低($230.50 \times 10^{-6} \sim 675.80 \times 10^{-6}$)^[12]。而其他盆地奥陶系白云岩铁含量并不如鄂尔多斯盆地高,塔里木盆地中部奥陶系粉晶细晶白云岩的铁含量在 $175 \times 10^{-6} \sim 325 \times 10^{-6}$,最高的中粗晶白云岩均值也仅为 650×10^{-6} ^[13]。

目前对马五段白云岩的成因一直存在争议,流体的来源可能有蒸发海水、地层水、热液活动等^[8,14-15],而关于白云石的富铁原因目前更缺乏专门的讨论。

本文以鄂尔多斯盆地奥陶系马五段白云岩为研究对象,通过分析白云石的内部组分、微量元素和碳氧同位素特征,来探讨富铁白云石中 Fe 来源,进而分析对储层的影响。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地奥陶系马五段沉积环境为蒸发台地(图 1),为一套白云岩为主,富含蒸发盐矿物的沉积层系^[16-17]。海平面频繁变化,纵向上又分为 10 个亚段,每个亚段的沉积相和岩性并不相同,其中马五 1—马

五 4、马五 6 和马五 8 为含膏层系,而马五 5、马五 7 和马五 9 为较纯的白云岩或灰岩。成岩之后,这套地层经历了漫长的加里东期的风化暴露剥蚀,石炭纪后又继续进入埋藏期,受各种成岩作用影响^[18-19]。

2 样品采集与分析方法

样品采集于鄂尔多斯盆地南部的富县地区、中部的

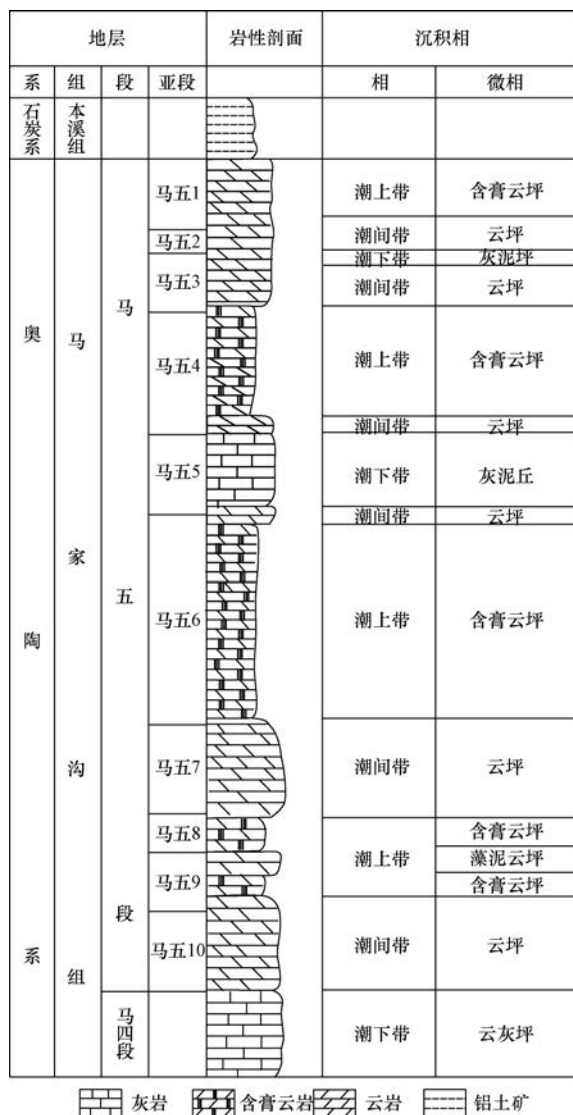


图 1 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段综合柱状图

Fig. 1 Stratigraphic Column of the 5th member of the Majiagou in the Ordovician, Ordos Basin

大牛地地区和西部的苏里格等地区 28 口钻井,以及盆地东部晋西地区野外剖面马五段。首先对钻井取心段和野外剖面进行详细观察描述,然后在显微镜下鉴定分析白云岩类型,最后选择合适的样品,进行碳酸盐岩的阴极发光和电子探针分析以及碳、氧同位素分析。

电子探针分析在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所完成,测试仪器为 JEOL JXA-8230。碳氧同位素分析在核工业地质分析测试研究中心完成,分析仪器为 MAT 253,测试方法见国家行业标准《碳酸盐矿物或岩石中碳、氧同位素组成的磷酸法测定》(DZ/T 0184.17—1997)。

3 白云岩岩石学特征

鄂尔多斯盆地马家沟组五段白云岩,按照 Sibley 和 Gregg(1987)^[20] 晶粒大小和形态可分为两种类型:晶粒较细的微晶白云岩(M型)和晶粒相对较粗的粉细晶白云岩(F型),在矿物结构和组成上有一定的差别。

M型微晶白云岩多发育于马五段的马五1—马五

4、马五6和马五8亚段。白云石多为自形,晶粒较细,为微晶,在扫描电镜下可见晶间孔。在鄂尔多斯盆地马五段,微晶白云岩中常含有泥质和石膏,泥质多以条纹状产出,石膏以柱状单晶和圆形或次圆形结核存在于白云岩中。在表生岩溶期,硬石膏结核和单晶被溶解后,形成膏溶铸模孔,后又多有方解石、粉晶白云石、粗晶白云石或石英充填其中,粗晶白云石经茜素红和铁氰化钾染色后呈天蓝色(图2a)。在阴极发光下,基质白云石为暗红色,粉晶白云石充填物内部与基质相似,而边缘为亮红色(图2b)。M型微晶白云岩沉积环境主要为蒸发潮坪,形成于萨布哈白云岩化作用,这是靖边气田马五段最主要的储层岩石类型。

F型粉—细晶白云岩多发育于马五段的马五5、马五7和马五9亚段。白云石多为自形—半自形,晶粒相对较粗,往往具有重结晶的特征,部分样品中可以见到颗粒幻影结构,裂缝、晶间孔和不规则溶孔发育,且有石英、白云石或方解石半充填(图2c)。在阴极发光下,基质白云石呈暗红色,白云石和石英充填物不发光(图2d),白云岩化程度在不同地区存在差异,西部地

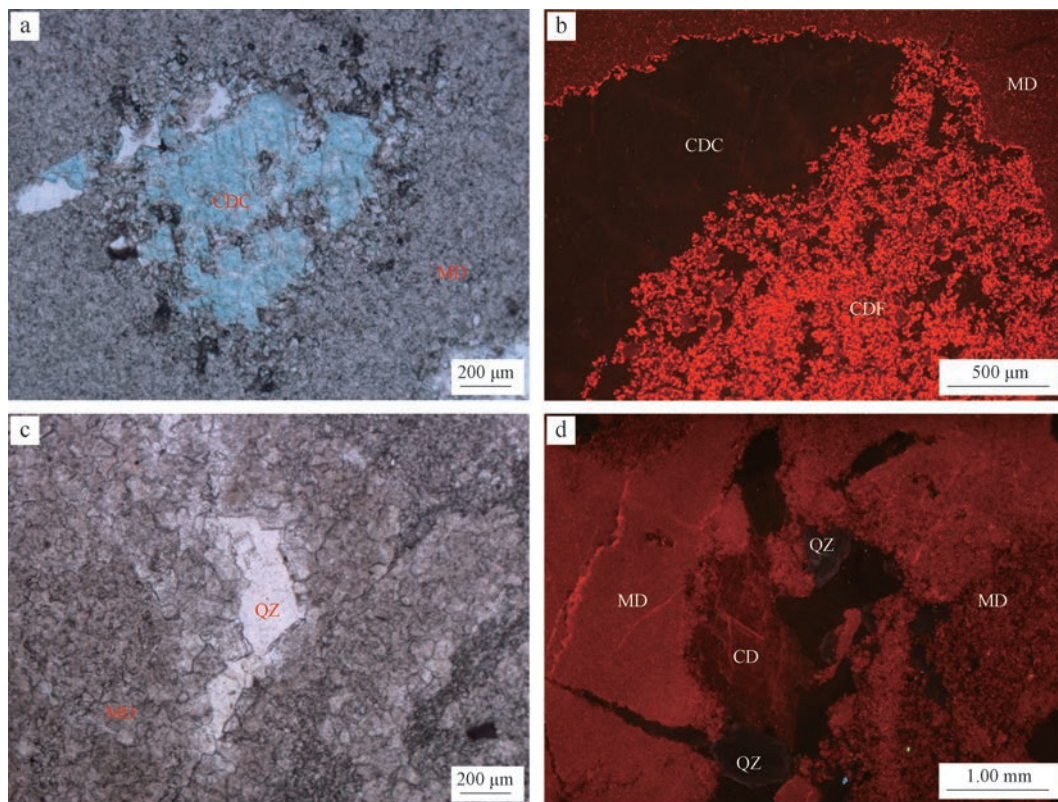


图2 鄂尔多斯盆地马五段两种不同类型的白云岩

Fig. 2 Two types of dolostones in the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

- a. M型泥—粉晶白云岩,硬石膏铸模孔发育,有粗晶白云石充填,陕338井,奥陶系马五段;b. M型泥—粉晶白云岩,硬石膏铸模孔发育,有粗晶白云石和粉晶白云石充填,莲5井,奥陶系马五段,阴极发光;c. F型粉—细晶白云岩,不规则溶孔发育,可见颗粒幻影,苏345井,马五段,单偏光;d. F型粉—细晶白云岩,不规则溶孔发育,有粗晶白云石充填,苏234井,马五段,阴极发光;
CD. 白云石充填物;CDF. 粉晶白云石充填物;CDC. 粗晶白云石充填物;MD. 白云石基质

区要优于东部地区,也存在未完全云化的过渡岩性,对于干旱的马五段沉积时期而言,其沉积环境为相对海进的潮坪-颗粒滩,原岩为灰岩,白云岩化作用可能发生于浅埋藏期,这类岩石是今年来奥陶系实现突破的新领域。

4 白云岩地球化学特征

4.1 白云岩中的铁及其变化

虽然鄂尔多斯盆地马五段具有较高的 Fe 含量,但 Fe 在两类白云岩内部中并不是均一分布的(图 3)。

在 M 型微晶白云岩中,基质白云石的铁含量相对较高,在 $583 \times 10^{-6} \sim 3\,811 \times 10^{-6}$ (图 3),富铁白云石主要以石膏铸模孔的孔隙充填物的形式存在,但也并不是所有的白云石充填物都富含铁。粉晶白云石充填物在孔隙多以示顶底半充填于孔隙之中,与 M 型基质白云石相似,铁含量在 $887 \times 10^{-6} \sim 2\,582 \times 10^{-6}$ 。虽然在部分样品中,粉晶白云石也富集铁元素,电子探针背散射照片显示,铁仅富集于粉晶白云石的边缘,且呈不规则浸染状(图 4a,b),这与阴极发光下的特征也一致。但铁含量最可达 $81\,752 \times 10^{-6}$,同时也具有较高的锰含量在 $565 \times 10^{-6} \sim 1\,588 \times 10^{-6}$ 。粗晶白云石充填物多为半自形,部分为晶面弯曲呈鞍状,铁茜素红染色后为天蓝色(图 2a),正交光下呈波状消光,电子探针微区分析显示铁含量普遍较高(图 4c),铁含量在 $29\,112 \times 10^{-6} \sim 47\,148 \times 10^{-6}$,均匀分布于晶体之中。

在 F 型粉-细晶白云岩中,其基质白云石的铁含量略低于 M 型泥-粉晶白云岩(图 3),但仍高于同期灰岩,最高为 $2\,007 \times 10^{-6}$,最低为 233×10^{-6} ;同样,裂缝和孔隙内充填的白云石的铁含量也是这类白云岩最

高的组构,这类白云石与 M 型白云岩中的粗晶白云石充填物相类似,电子探针背散射图像显示铁在白云石充填物均匀分布(图 4d),铁含量可达 $9\,178 \times 10^{-6}$ 。另外,在孔隙发育区的基质白云石边缘也常常受到铁质浸染(图 4d),铁含量在 $4\,021 \times 10^{-6} \sim 13\,963 \times 10^{-6}$ 。

其中,M 型白云岩中的粗晶白云石孔隙充填物和 F 型白云岩中孔隙充填物整体铁含量都较高,而 M 型白云岩中的粉晶白云石孔隙充填物边缘和 F 型白云岩中孔隙附近白云石晶体中只有边缘部分受浸染,具有较高 Fe 含量。越靠近孔隙,Fe 则越容易富集(图 3),这与肖晖和赵靖舟(2013)^[11]的认识相一致。Mn 含量与 Fe 含量有非常好的相关性,但是 M 型微晶白云岩中锰含量要远远的高于 F 型泥粉-晶白云岩。

4.2 碳、氧同位素特征

M 型微晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) 值在 $-3.5\text{‰} \sim -1.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) 值在 $-6.5\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$,碳同位素与同期海水值($0.5\text{‰} \sim -2\text{‰}$)较为接近(图 5),氧同位素比同期海水($-6.6\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$)略微偏负,这与萨布哈白云岩化 ^{18}O 同位素更为富集,氧同位素偏正的认识相悖,这可能是与长期的暴露大气降水的影响有关。孔隙充填物粉晶白云石 $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) 值在 $-0.7\text{‰} \sim -2.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) 值在 $-9.8\text{‰} \sim -11.5\text{‰}$,碳同位素接近同期海水值,氧同位素相比同期海水以及基质更为偏负,说明其受到流体的影响更为强烈,可能与边缘 Fe 的浸染有一定的联系。孔隙充填物粗晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) 值范围在 $-1.7\text{‰} \sim -2.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) 值范围在 $-9.9\text{‰} \sim -11.3\text{‰}$,粗晶白云石的碳氧同位素值较基质白云石都明显偏负,反映了基质白云石成因差异,且可能受到过热水或

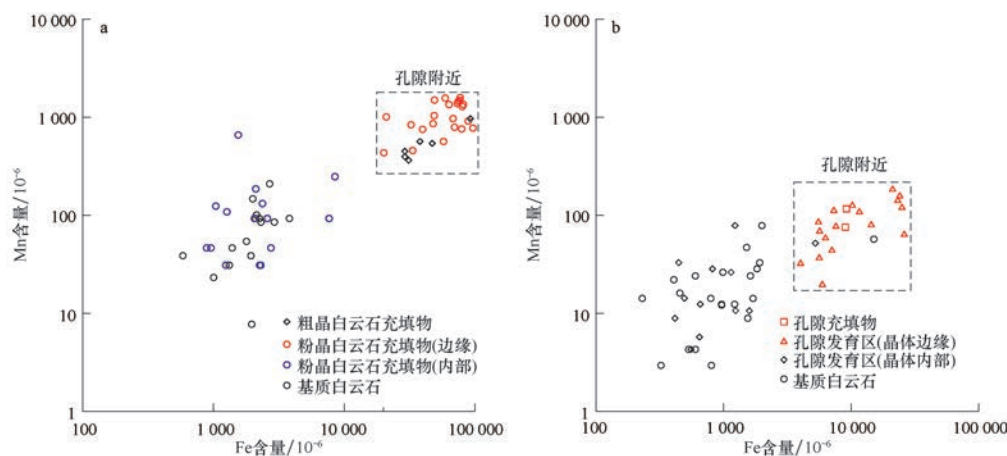


图3 鄂尔多斯盆地马五段白云岩 Fe-Mn 含量

Fig. 3 Fe and Mn content in the dolostones from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

a. M 型微晶白云岩; b. F 型粉-细晶白云岩

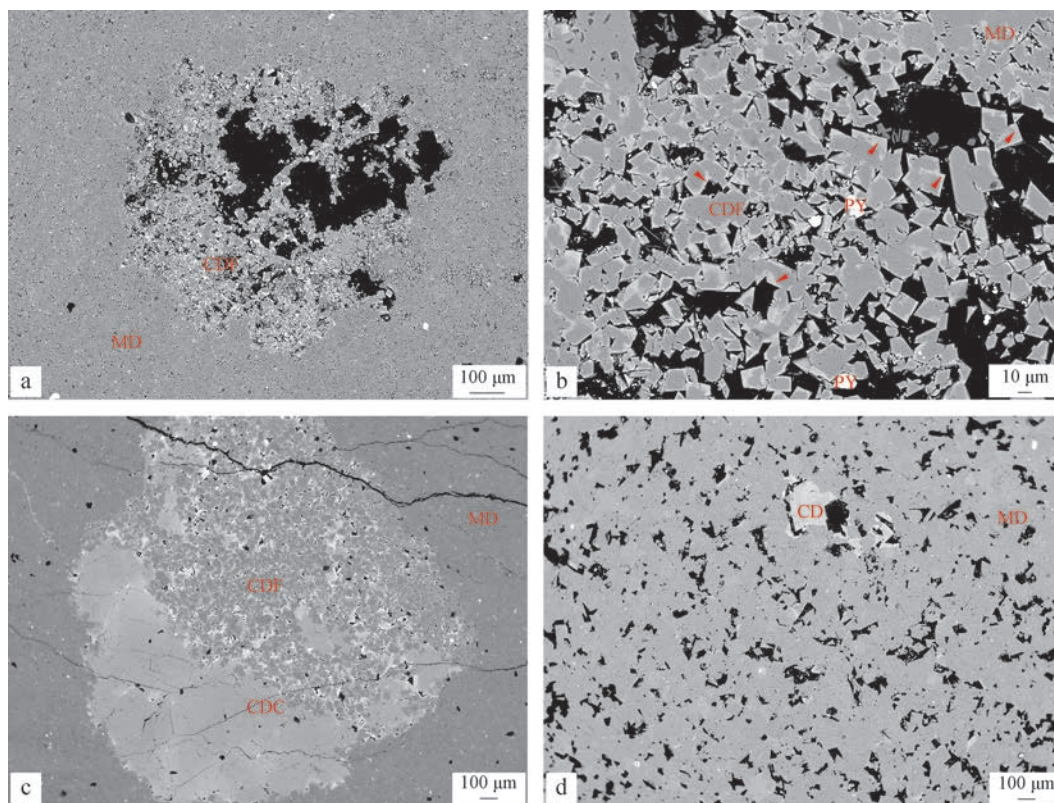


图4 鄂尔多斯盆地马五段白云岩背散射照片

Fig. 4 Backscatter features of dolomites from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

a. M型泥-粉晶白云岩,硬石膏铸模孔发育,有粉晶白云石充填,粉晶白云石边缘被富铁浸染,陕338井,马五段;b. M型泥-粉晶白云岩,硬石膏铸模孔发育,有粉晶白云石充填,粉晶白云石边缘被富铁浸染,如箭头所示,为A局部放大,陕338井,马五段;c. M型泥-粉晶白云岩,硬石膏铸模孔发育,有粉晶白云石和粗晶白云石充填,粗晶白云石为整体富铁,而粉晶白云石仅为边缘富铁,莲5井,马五段;d. F型粉-细晶白云岩,晶间孔发育,有富铁白云石充填,孔隙发育附近基质白云石被浸染,苏345井,马五段;

CD. 白云石充填物;CDF. 粉晶白云石充填物;CDC. 粗晶白云石充填物;MD. 白云石基质;PY. 黄铁矿,

(视域内图像亮度与Fe含量有一定的相关性。)

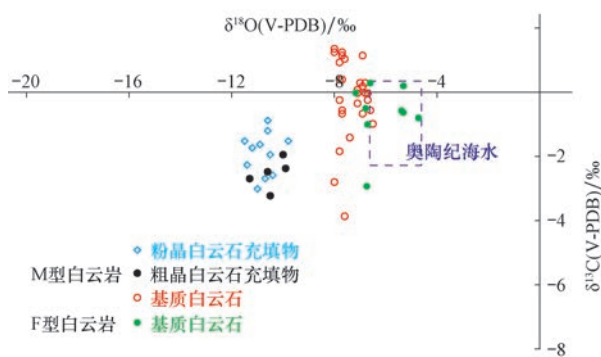


图5 鄂尔多斯盆地马五段白云岩碳、氧同位素交会图

Fig. 5 Crossplot showing C and O isotope values in dolomites from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

者大气降水的改造。

F型粉-细晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ 值在 -0.4% ~ -0.8% , $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ 值在 -5.3% ~ -6.6% ,碳同位素和氧同位素都与同期海水值较为接近,说明其白云岩化流体来源于海水,且形成时,应处于浅埋藏

阶段,而且由于岩溶时期其埋藏较深,受大气降水的影响较弱。

5 富铁白云石成因

5.1 铁的来源

M型微晶白云岩富含蒸发矿物,是准同生期萨布哈白云岩化作用的产物^[21],但是长期的暴露,大气降水的影响使得氧同位素偏负,F型粉-细晶白云岩的形成流体具有海水的特征,其形成可能略晚于萨布哈白云岩化作用,可能为浅埋藏期渗透回流白云岩化作用的产物。这两类白云岩基质形成的深度都相对近地表,不具备富集Fe条件。

由于 Fe^{2+} 只有在较高的温度、还原条件下才能进入白云石晶格交代白云石中 Mg^{2+} ,因此富铁白云石无法在同生和准同生时期海水环境中形成,只有在埋藏

条件下,较高温度的流体中才能生成。而 Fe 在两类白云岩中的分布富集特征,也展示了 Fe 来源于后期改造,而非原生沉积。故而,诸多学者^[22]认为粉-细晶白云岩富含 Fe 和 Mn 的原因是经历了深埋藏环境下热水岩溶作用的结果。

鄂尔多斯盆地马五段的白云岩富含铁又是非常普遍的,在整个盆地马五段不同岩性的白云岩中都有一定含量的铁。假如富铁白云岩来源于热水,则需要一个与之相匹配的遍布全盆的热水事件相对应。但是除了盆地西缘南缘有构造热事件报道外^[23-24],在盆地内部缺少构造热水活动的证据,这也是鄂尔多斯盆地与四川盆地和塔里木盆地不同之处。另外,富铁白云石,特别是 F 型白云岩碳、氧同位素与典型的热改造白云岩^[25]差别明显,反而与同时期海水的同位素特征更为接近。因此热水并非是马五段白云岩中的主要铁源,可能另有其源。

马五段白云岩中广泛分布的富铁白云岩,需要同样广泛分布的 Fe 源。在盆地内马五段的顶部恰恰有一套富铁的地层本溪组含矿层系,该层自下而上可划分为 3 段(图 6):下段为铁质粘土岩建造,Fe₂O₃ 含量可达 15.6%~24.41%^[26]。中段为粘土岩、铝土矿和硬质粘土矿建造,为主要含矿层位。上段为含碳泥质粉砂岩、泥质灰岩建造夹煤层,这套层系为马家沟组经长期风化剥蚀残积而成^[27]。而在盆地内广泛分布的马五段之上的铁质粘土岩,可作为白云岩中铁质的直接来源。

实际上,这层本溪组含矿层系又作为一套区域的“盖层”,层系之下的流体,包括后期的油气活动,都受到它的限制,铁质粘土岩及以下的马家沟组白云岩自成封闭体系,使之能够具备还原的条件。另外,马五段气藏可能发生过硫酸盐热化学还原反应(TSR)^[28],酸性有机流体以及相关的 TSR 反应都能够使 Fe³⁺ 转化为还原态的 Fe²⁺,在本溪组与马五段地层中黄铁矿都较为常见,也可能是这种还原反应的产物(图 4b)。

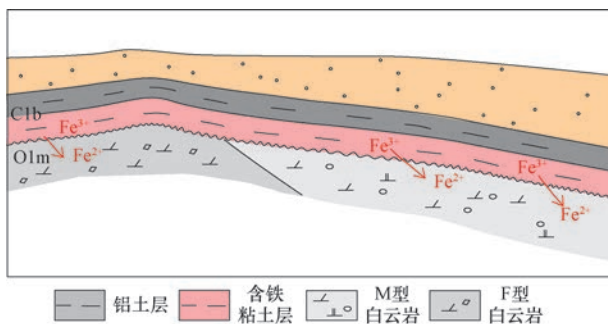


图6 鄂尔多斯盆地马五段富铁白云石形成演化模式

Fig. 6 Formation pattern of iron-rich dolomites from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

埋藏到一定深度时,地层具有相对较高的地温,Fe²⁺更容易进入白云石晶格(图 6)。Mn 与 Fe 具有相似的地球化学特征和富集过程。在表生氧化条件下形成高价稳定的 Mn⁴⁺ 氧化物,从碳酸盐岩中残积,在风化壳中富集^[29],而进入埋藏期后又与 Fe 类似被还原为低价 Mn²⁺ 而进入白云石晶格,从而 Mn 含量与 Fe 含量表现出很好的相关性。而含量的差异可能与分布的范围有关,位于盆地中西部的 F 型白云岩,上覆铝土矿较薄,位于盆地中东部的 M 型白云岩,上覆铝土矿较厚,对应最高含量的铁和锰。

5.2 富铁的形成模式

两类白云岩分别形成于准同生和浅埋藏阶段,其后在奥陶纪末期,开始了漫长的风化剥蚀,在白云岩中形成了大量的硬石膏铸模孔、晶间孔和不规则溶孔,并在其上残积了一套富铁的本溪组地层。当马五段及上覆的铁质粘土岩再次进入埋藏期,铁质粘土岩中富铁的流体在重力的作用下,向下部的地层运移,由于环境的变化,氧化态 Fe³⁺ 转化为还原态的 Fe²⁺,当到一定温度时,Fe²⁺ 更容易进入白云石晶格,形成富铁白云岩。

富铁流体的运移和富集与岩层的孔渗条件有密切的联系,只有在较高孔渗条件的岩层,富铁流体才能进入。因此铁的富集可能与孔隙的发育有一定联系。在孔隙发育区,如 M 型白云岩的膏溶铸模孔和 F 型白云岩的晶间孔和裂缝中,富铁流体不断汇集,在孔隙中富铁的白云石充填物^[30],并对孔隙周围的粉晶白云石充填物以及基质发生浸染,使得晶体部分富集铁元素。

参 考 文 献

- [1] Chan M Y, Gregg J M, Shelton K L. Dolomitization and dolomite neomorphism: trenton and black river limestones (Middle Ordovician) Northern Indiana U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70 (1): 265 - 274.
- [2] Al-Aasm I S, Lonnee J, Clarke J. Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite: case studies from Middle Devonian carbonates of the Western Canada Sedimentary Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19 (3): 209 - 217.
- [3] Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Qian Yixiong, et al. Formation of saddle dolomites in Upper Cambrian carbonates, western Tarim Basin (northwest China): Implications for fault-related fluid flow [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26 (8): 1428 - 1440.
- [4] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52 (1): 1 - 81.
- [5] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235 (1): 7 - 63.

- [6] Gregg, J M, Bish D L, Kaczmarek, S E, Machel, et al. Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: A review [J]. *Sedimentology*, 2015, 62 (6): 1749 – 1769.
- [7] 赵俊兴, 陈洪德, 张锦泉, 等. 鄂尔多斯盆地中部马五段白云岩成因机理研究[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 38 – 41.
Zhao Junxing, Chen Hongde, Zhang Jinquan, et al. Genesis of dolomite in the fifth member of Majiagou Formation in the middle Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 38 – 41.
- [8] 姚泾利, 王保全, 王一, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. *沉积学报*, 2009, 27(3): 381 – 389.
Yao Jingli, Wang Baoquan, Wang Yi, et al. Geochemical characteristics of dolomites in lower Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 381 – 389.
- [9] 史基安, 邵毅, 张顺存, 等. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(3): 316 – 324.
Shi Jian, Shao Yi, Zhang Shuncun, et al. Lithofacies paleogeography and sedimentary environment in Ordovician Majiagou Formation, Eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(3): 316 – 324.
- [10] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2230 – 2238.
Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2230 – 2238.
- [11] 杨华, 王宝清, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地古隆起周边地区奥陶系马家沟组储层影响因素[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(3): 9 – 16.
Yang Hua, Wang Baoqing, Sun Liuyi, et al. Influencing factors of reservoirs for Ordovician Majiagou Formation in the surrounding area of paleo-uplift in Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(3): 9 – 16.
- [12] 肖晖, 赵靖舟, 王大兴, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系原生天然气地球化学特征及其对靖边气田气源的意义[J]. *石油与天然气地质*, 2013, (5): 601 – 609.
Xiao Hui, Zhao Jingzhou, Wang Daxing, et al. Geochemical characteristics of primary gas in the Ordovician and their significance for the gas source of Jingbian gas field, Ordos Basin [J]. *Oil and Geology*, 2013, (5): 601 – 609.
- [13] 胡明毅, 胡忠贵, 李思田, 等. 塔中地区奥陶系白云岩岩石地球化学特征及成因机理分析[J]. *地质学报*, 2011, 85(12): 2060 – 2069.
Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Li Sitian, et al. Geochemical characteristics and genetic mechanism of the Ordovician dolostone in the Tazhong area, Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(12): 2060 – 2069.
- [14] 张永生. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群中部块状白云岩的深埋藏白云石化机制[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 424 – 430
Zhang Yongsheng. Mechanism of deep burial dolomitization of massive dolostones in the middle Majiagou Group of the Ordovician, Ordos basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 424 – 430
- [15] 黄擎宇, 张哨楠, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系马家沟组白云岩成因研究[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(2): 147 – 153
Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, et al. Origin of dolomite of Ordovician majiagou, western and southern margin of the Ordos Basin [J]. *Petroleum geology and Experiment*, 2010, 32(2): 147 – 153.
- [16] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟期岩相古地理[J]. *沉积学报*, 1999, 17(1): 1 – 8.
Feng Zengzhao, Bao Zhidong. Lithofacies paleogeography of Majiagou Age of Ordovician in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(1): 1 – 8.
- [17] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 106 – 112.
Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Dong Zhaoxiong, et al. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 106 – 112.
- [18] 方少仙, 何江, 侯方浩, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田区中奥陶统马家沟组马五₅ – 马五₁ 亚段储层孔隙类型和演化[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2425 – 2441.
Fang Shaoxian, He Jiang, Hou Fanghao, et al. Reservoirs pore space types and evolution in M55 to M51 submembers of Majiagou Formation of Middle Ordovician in central gasfield area of Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2425 – 2441.
- [19] 席胜利, 李振宏, 王欣, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系储层展布及勘探潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 405 – 412.
Xi Shengli, Li Zhenhong, Wang Xin, et al. Distribution and exploration potential of Ordovician reservoir in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3): 405 – 412.
- [20] Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock textures [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(6): 967 – 975.
- [21] 刘德良, 孙先如, 李振生, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(2): 155 – 161.
Liu Deliang, Sun Xianru, Li Zhensheng, et al. Analysis of carbon and oxygen isotope on the Ordovician dolostones in the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2006, 28(2): 155 – 161.
- [22] 郑聪斌, 章贵松, 王飞雁. 鄂尔多斯盆地奥陶系热水岩溶特征[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 524 – 529.
Zheng Congbin, Zhang Guisong, Wang Feiyan. Hot water karst characteristics of Ordovician Period in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4): 524 – 529.
- [23] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 674 – 684.
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli et al. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 674 – 684.
- [24] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 50(S1): 23 – 32.
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos Basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(s1): 23 – 32.

- [25] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90 (11): 1641–1690.
- [26] 陈旺. 豫西石炭纪铝土矿成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
Chen Wang. Carboniferous bauxite ore-forming system, western Henan [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [27] 陈连红, 王瑞廷, 刘维东. 陕西省渭北铝土矿地质特征及找矿前景分析[J]. 西北地质, 2010, 43(3): 93–98.
Chen Lianhong, Wang Ruiting, Liu Weidong. Geological characteristics and prospecting perspective of Weiwei Bauxite Deposits, Shanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(3): 93–98.
- [28] 杨华, 张文正, 咎川莉, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系盐下天然气地球化学特征及其对靖边气田气源再认识[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(1): 8–14.
- Yang Hua, Zhang Wenzheng, Zan Chuanli, et al. Geochemical characteristics of Ordovician subsalt gas reservoir and their significance for reunderstanding the gas source of Jingbian Gasfield, East Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(1): 8–14.
- [29] 李景阳, 朱立军, 梁风. 碳酸盐岩风化壳界面土层的结构和矿物学特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(4): 301–307.
Li Jingyang, Zhu Lijun, Liang Feng. Characteristics of structure and minerology of interface laterite in weathering crust of carbonate rocks [J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(4): 301–307.
- [30] 张军涛, 金晓辉, 李淑筠, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段孔隙充填物类型与成因[J]. 2016, 石油与天然气地质, 37(5): 684–690.
Zhang Juntao, Jin Xiaohui, Li Shujun, et al. Types and origin of pore-fillings from 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 684–690.

(编辑 董立)

(上接第775页)

- [17] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 1–9.
Zhou Jingao, Xu Chunchun, Yao Genshun, et al. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 158–166.
- [18] 冯伟明, 谢渊, 刘建清, 等. 上扬子下寒武统龙王庙组沉积模式与油气勘探方向[J]. 地质科技情报, 2014, 33(3): 106–111.
Feng Weiming, Xie Yuan, Liu Jianqing, et al. Upper-Yangtze Longwangmiao formation carbonate platform mode and hydrocarbon exploration [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(3): 106–111.
- [19] 高树生, 胡志明, 安为国, 等. 四川盆地龙王庙组气藏白云岩储层孔洞缝分布特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 103–109.
Gao Shusheng, Hu Zhiming, An Weiguo, et al. Distribution characteristics of dolomite reservoir pores and caves of Longwangmiao Formation gas reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 103–109.
- [20] 刘树根, 宋金民, 赵异华, 等. 四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 657–670.
Liu Shugen, Song Jinmin, Zhao Yihua, et al. Controlling factors of formation and distribution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation high-quality reservoirs in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 657–670.
- [21] 田艳红, 刘树根, 赵异华, 等. 四川盆地中部龙王庙组储层成岩作用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 671–683.
Tian Yanhong, Liu Shugen, Zhao Yihua, et al. Diagenesis of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in central area of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 671–683.
- [22] 郑和荣, 胡宗全主编. 中国前中生代构造—岩相古地理图集[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
Zheng Herong, Hu Zongquan. Tectonic-lithofacies paleogeography map of the Pre-Mesozoic in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [23] 李皎, 何登发. 四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造沉积环境演化[J]. 古地理学报, 2014, 16(4): 441–460.
Li Jiao, He Dengfa. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Cambrian in Sichuan Basin and adjacent areas [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(4): 441–460.
- [24] 宁博, 王起琮, 李百强, 等. 鄂尔多斯盆地马五5亚段白云化成因模式[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5): 531–538.
Ning Bo, Wang Qicong, Li Baiqiang, et al. Genetic Model for M5-5 Sub-Member dolomitization of Majiegou Formation in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5): 531–538.
- [25] 刘德良, 孙先如, 李振生, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 155–161.
Liu Deliang, Sun Xianru, Li Zhensheng, et al. Analysis of carbon and oxygen isotope on the Ordovician dolostones in the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 155–161.
- [26] J. Warren. Dolomite occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1): 1–81.
- [27] 福里格. 碳酸盐岩微相: 分析、解释及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Erik Flugel. Microfacies of Carbonate Rocks: analysis, interpretation and application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.

(编辑 张玉银)