

鄂尔多斯盆地奥陶系马五段孔隙充填物类型与成因

张军涛¹,金晓辉¹,李淑筠¹,李 维²,孙宜朴¹

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石化 江苏油田地质科学研究院,江苏 扬州 225009)

摘要:鄂尔多斯盆地马五段主要孔隙类型为硬石膏结核溶模孔,充填矿物有方解石、粉晶白云石、粗晶白云石,以及少量的石英、硬石膏、高岭石等。方解石多为粗晶,阴极发光下为黄色,具有较低的Fe含量、中等Mn含量,明显偏负的碳、氧同位素,说明其形成于大气降水环境中。粉晶白云石多为半充填,矿物学特征与基质白云石类似,与基质白云石具有同源性,但具有两种阴极发光情况,一类为橘色,另一类与基质白云石相近,为暗红色,电子探针背散射下,可分为外边和内核两部分,内核的Fe和Mn的含量与基质白云石相近,外边具有较高的Fe和Mn含量。粉晶白云石较基质白云石碳、氧同位素偏负,这些差异反映了成岩流体的变化。粗晶白云石染色后呈蓝色,具有较高的Fe和Mn含量,较负的碳、氧同位素,其可能形成于后期的热流体活动。因此,不同类型的充填物是不同流体活动的结果。方解石形成于表生期的大气降水充填作用,与岩溶古地貌有一定的联系,多分布于流体相对充足地势相对低洼的区域;而粉晶白云石的含量则与沉积环境相关,后经历过热流体改造;粗晶白云石的形成于与裂缝相关的热流体活动。

关键词:孔隙充填物;白云石;方解石;碳酸盐岩储层;马五段;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Types and origin of pore-fillings from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos BasinZhang Juntao¹, Jin Xiaohui¹, Li Shujun¹, Li Wei², Sun Yipu¹

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Geological Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Mold pore of anhydrite nodule is the major pore type in the 5th member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin. The fillings of the pore consist mainly of calcite, very fine crystalline dolomite, and coarse crystalline dolomite, as well as a small amount of quartz, anhydrite, kaolinite, etc. The calcite, fully filling the pores, is mostly coarse crystalline and shows yellow color under cathodoluminescence. Its moderate Mn content, a relatively low Fe content and the obviously negative $\delta^{18}\text{O}$ values indicate that the calcite deposited in atmospheric environment. The very fine crystalline dolomite, usually partly filling the pores, is similar to matrix dolomite in mineralogy and origin. It shows two color types (one is light orange and the other is dark red similar to matrix dolomite) under cathodoluminescence. The very fine crystalline dolomite can be divided into two parts under electron probe backscatter: the core and the cortex. The Fe and Mn content of the core are close to that of the matrix dolomite, while the cortex has the highest Fe and Mn content in carbonate minerals. Furthermore, its $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values are more negative than that of the matrix dolomite. These features illustrate the change of diagenetic fluids. The coarse crystalline dolomite, blue after dyeing, has higher Mn and Fe content, relatively negative $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values, suggesting a possible late hydrothermal fluid origin. Different pore-fillings in the reservoir are the results of different fluids. The calcite is possibly the result of meteoric water filling in hypergenic stage and has certain relationship with karst paleogeomorphology. It commonly occurs in low-lying areas with sufficient fluids. In contrast, the very fine crystalline dolomite is related to sedimentary environments and altered by hydrothermal fluids. The formation of coarse crystalline dolomite as a result of hydrothermal fluids associated with fractures.

Key words: pore-filling, dolomite, calcite, carbonate reservoir, Majiagou Formation, Ordovician, Ordos Basin

收稿日期:2015-12-01;修订日期:2016-08-20。

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:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214802);国家自然科学基金联合基金项目(U1663209);国家科技重大专项(2011ZX05005002)。

流体活动在碳酸盐岩储层形成演化过程中起着极其重要的作用^[1-6]。流体改造的主要形式有白云岩化作用、重结晶作用、溶蚀作用和充填作用等。溶蚀作用形成储集空间,充填作用阻塞储集空间。而孔隙充填物作为流体活动最直接的产物,保留了流体作用的痕迹,记录了流体作用的性质,是碳酸盐岩储层研究的热点^[1-8]。

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段(马五段)为一套富含硬石膏的白云岩层系,沉积环境为蒸发台地^[9-13]。在漫长的成岩演化过程中,岩层经历了多元且复杂的流体作用改造。其中影响最大是大气降水溶蚀作用,形成了最主要的储集空间——硬石膏结核溶模孔^[13-18]。另外,多期次流体作用还表现为孔隙中形成了方解石、白云石以及石英、石膏、高岭石等多种类型的充填物^[17]。其中方解石和白云石充填物具有一定分区性,已经有所关注,但对于流体的性质、流体作用差异性及其对储层的影响,研究还相对较少。

本文选取鄂尔多斯盆地不同地区的马五段样品,分析孔隙充填物矿物组合、空间分布、矿物学和地球化学特征,试图查明充填物的成因,揭示储层成岩过程中流体活动的差异,并探讨其对储层储集性能的影响。

1 实验方法

样品采集于鄂尔多斯盆地南部的富县地区、中部的大牛地地区、西部的苏里格等地区钻井以及盆地东部晋西地区野外剖面马五段中。首先对钻井取心段和野外剖面进行详细观察描述,分析孔隙充填物的发育分布情况,然后在显微镜下鉴定分析充填物矿物组合类型,最后选择合适的样品,进行碳酸盐岩的阴极发光、电子探针分析以及碳氧同位素分析。

电子探针分析在中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。

2 充填矿物类型

鄂尔多斯盆地内部奥陶系马五段的主要储集空间是硬石膏结核溶模孔,这类孔隙形成于硬石膏结核的溶解,呈层状、透镜状产出。在岩心上显现为麻点状、针孔状或蜂窝状,其形状主要为圆形或次圆形(图1)。而大量的显微镜观察显示,大部分的膏溶孔隙都存在孔隙充填物。

通过对不同地区样品的薄片分析,并结合对已有研究成果的统计^[17],发现研究区孔隙内充填矿物主要有3种:方解石、白云石和石英。白云石又细分为粉晶白云石和粗晶白云石两类(图2),另外也能见到少量的硬石膏、高岭石、地开石、燧石、黄铁矿等。充填物组合类型上呈现出多样性,既可能是粉晶白云石、方解石、石英、粗晶白云石等单一矿物,也存在粉晶白云石与方解石,粉晶白云石与石英,粉晶白云石与粗晶白云石,粗晶白云石与石英,粉晶白云石与粗晶白云石、石英等不同矿物的组合。而根据充填程度又分为:未充填、半充填和完全充填三种类型。其中,粉晶白云石、石英、粗晶白云石等多以半充填形式出现,而方解石则多完全充填(图2)。在空间分布上也有一定的差异,方解石主要分布在盆地东部地区,而白云石主要分布于盆地中西部地区^[17]。

2.1 方解石

方解石充填物,往往完全充填于整个圆形的硬石膏结核溶模孔中。主要为粗晶、他形(图3a)。在阴极发光亮橙色,与发暗红色光的粉晶白云岩基质相比具有更强的发光性(图3b)。一般的,Fe是阴极发光的淬灭剂,Mn是阴极发光的激发剂,即较高的Mn含量

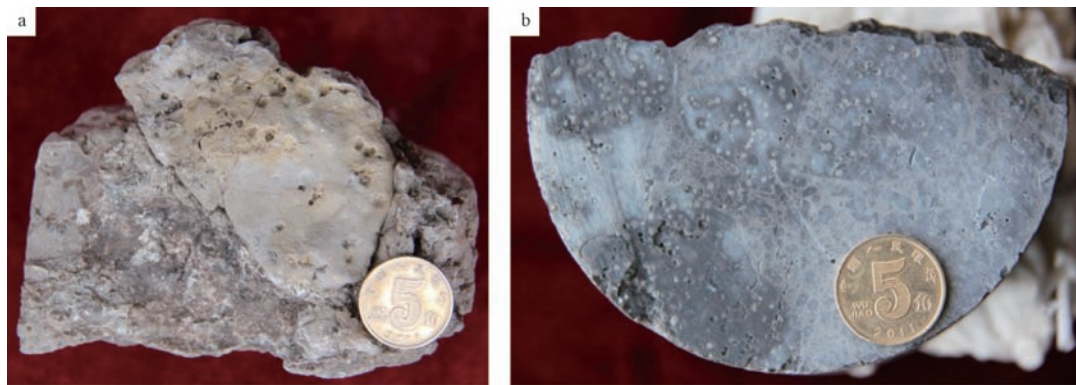


图1 鄂尔多斯盆地马五段含膏白云岩岩心特征

Fig. 1 Core features of dolomite containing anhydrite from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin
a. 角砾白云岩,硬石膏结核溶模孔发育,大98井,埋深2 883 m; b. 角砾岩,硬石膏结核溶模孔发育,呈麻点状,富古7井,埋深2 960 m

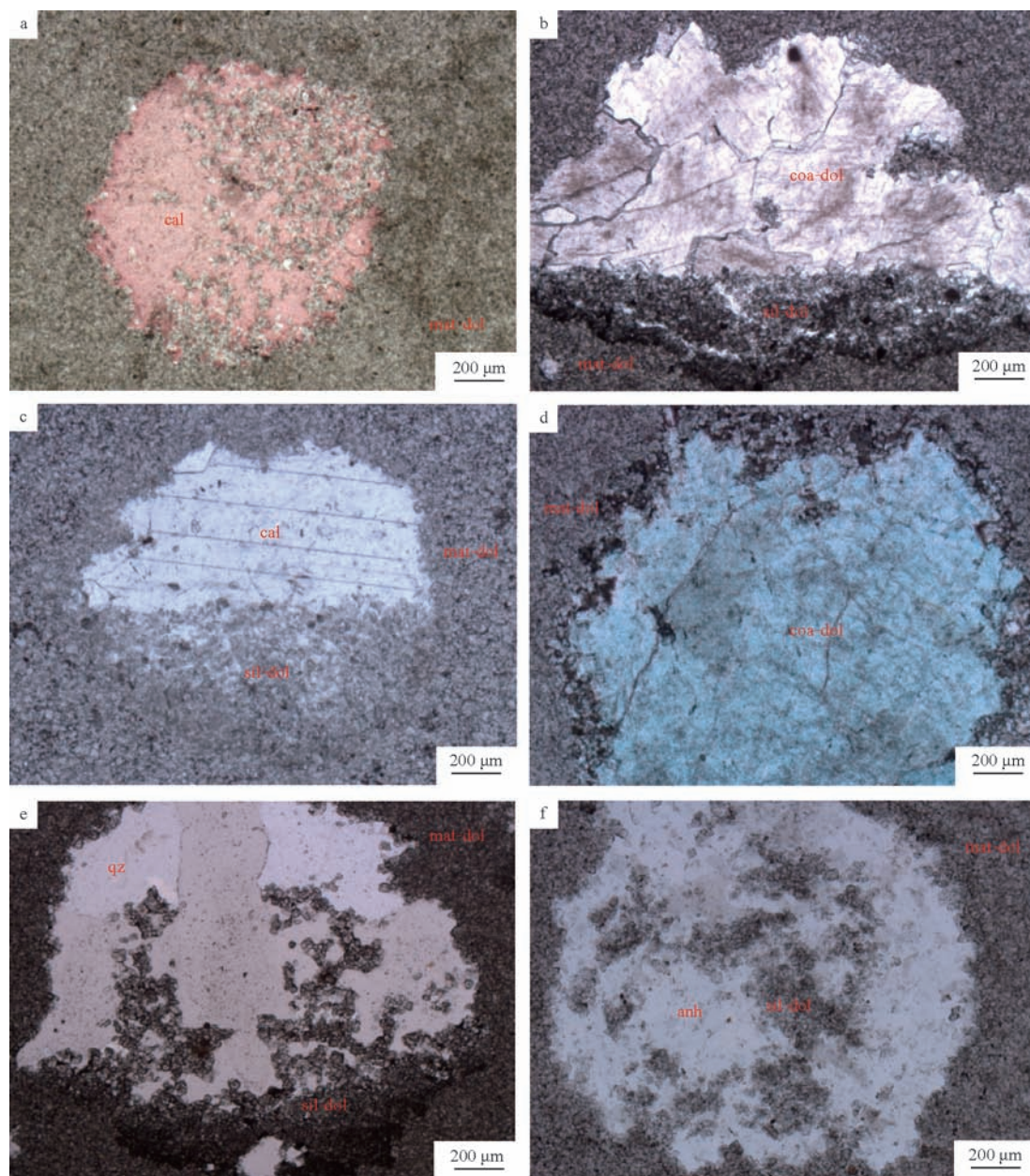


图2 鄂尔多斯盆地马五段硬石膏结核溶模孔微观特征

Fig. 2 Micrograph of mold pores of anhydrite nodules from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

a. 硬石膏结核溶模孔, 方解石充填, 富古4井, 单偏光, 染色, 埋深3 170 m; b. 硬石膏结核溶模孔, 粉晶白云石和粗晶白云石充填, 莲5井, 单偏光, 埋深4 099 m; c. 硬石膏结核溶模孔, 粉晶白云石和方解石充填, 富古1井, 单偏光, 埋深3 128 m; d. 硬石膏结核溶模孔, 粗晶白云石充填, 大98井, 单偏光, 染色, 埋深2 883 m; e. 硬石膏结核溶模孔, 石英充填和粉晶白云石, 陕338井, 单偏光, 埋深3 799 m; f. 粉晶白云岩中的硬石膏结核, 并包裹有粉晶白云石, 新富1井, 单偏光, 埋深3 179 m;

cal. 方解石充填物; mat-dol. 基质白云石; anh. 硬石膏; coa-dol. 粗晶方解石充填物; sil-dol. 粉晶白云石充填物; qz. 石英

能够对应充填物具有较高的发光性^[19]。这与电子探针分析结果中也相吻合, 方解石与基质白云石相比具有较高的 Mn 含量(图4), 显示方解石充填物主要来源于表生期的大气降水, 因为, 大气水相对于海水具有更高的 Mn 含量^[19]。方解石充填物的碳、氧同位素值分布较广。其中, $\delta^{13}\text{C}$ (V - PDB) 值为 $-2.2\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ (V - PDB) 值为 $-6.6\text{‰} \sim -15.1\text{‰}$ 。氧同位素较基质白云石 ($-6.5\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$) 以及奥陶纪海水 ($-6.6\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$) 明显的偏负(图5), 也都印证了方解石充填物可能主要形成于大气降水环境之中。

而裂缝内充填的方解石 $\delta^{13}\text{C}$ (V - PDB) $-3.2\text{‰} \sim -8.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ (V - PDB) $-5.5\text{‰} \sim -16.4\text{‰}$, 与硬石膏结核溶模孔内的方解石有一定的差异(图5), 反映了裂缝充填期次的多样性。

2.2 粉晶白云石

粉晶白云石充填物, 半充填于硬石膏结核溶模孔隙, 表现为示顶底结构(图2), 据此此前多认为该类白云石为淡水成因或渗流砂^[15]。在显微镜下充填物以自形、粉晶为主, 扫描电镜下晶间孔发育。粉晶白云石

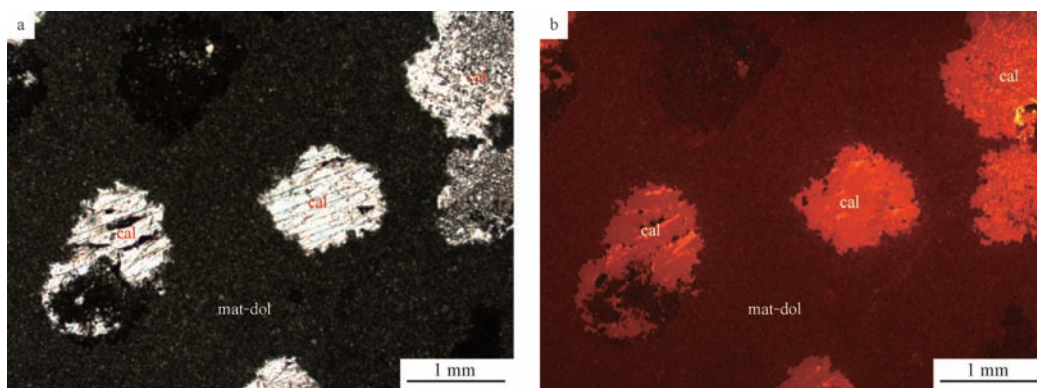


图 3 鄂尔多斯盆地马五段硬石膏结核溶模孔内方解石充填物阴极发光特征

Fig. 3 Cathodoluminescence features of calcite fillings in mold pores of anhydrite nodules from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

a, b. 硬石膏结核溶模孔, 方解石充填物, 新富 5 井, 埋深 2 891 m, a 为单偏光, b 为阴极发光
cal. 方解石充填物; mat-dol. 基质白云石

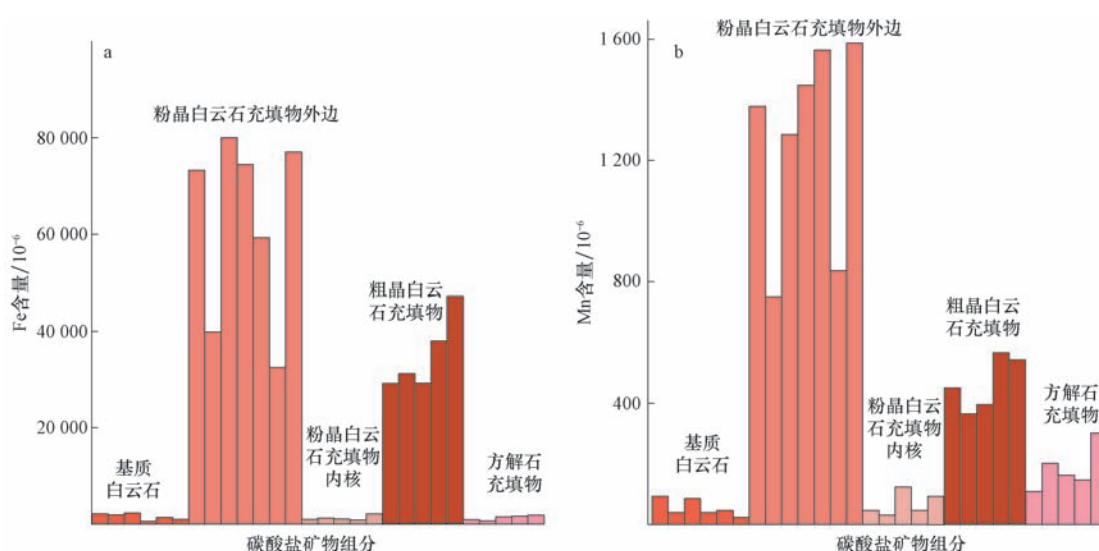


图 4 鄂尔多斯盆地马五段不同碳酸盐矿物组分 Fe(a) 和 Mn(b) 含量

Fig. 4 Fe(a) and Mn(b) contents of carbonate minerals from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

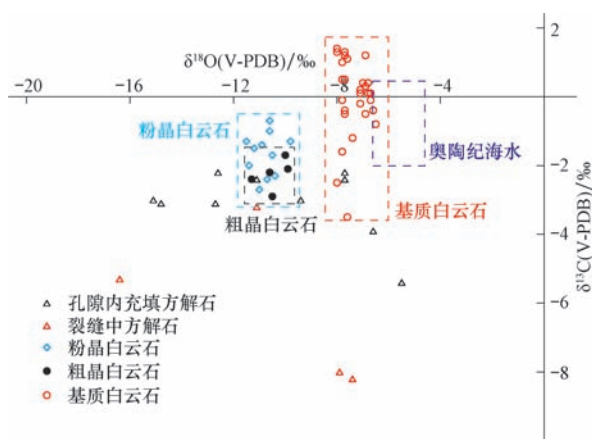


图 5 鄂尔多斯盆地马五段不同碳酸盐矿物组分
碳、氧同位素交会图

Fig. 5 Cross-plot of carbon and oxygen isotopes of carbonate minerals from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

矿物学特征与基质白云石差别不大(图 6a),可能预示粉晶白云石成因与基质类似。

在阴极发光下,粉晶白云石充填物有两种发光情况,一种是与基质白云石相似,阴极发光较弱,发暗红色光,而另一类则具有较强的发光性,呈亮红色光(图 6b)。

电子探针背散射显示,前者与基质白云石具有相似的成分组成(图 7a, b),而后者粉晶白云石可分为外缘和内核两部分(图 7c, d),外缘具有较亮的白色,内核呈暗色。其中内核的 Fe 和 Mn 含量以及 Ca/Mg 比值也与基质白云石都非常接近(图 4),微量元素较低, Ca/Mg 比值在 1 左右,这也反映粉晶白云石充填与基质白云石同源性。粉晶外缘具有较高的 Fe 含量,异常高的 Mn 含量(图 4),可能是阴极发光下呈亮黄色光的原因,说明其受到过富 Fe 和 Mn 流体的改造。第二类粉晶白云石充填物的 $\delta^{13}\text{C}$ (V - PDB) 值在 $-0.7\text{‰} \sim$

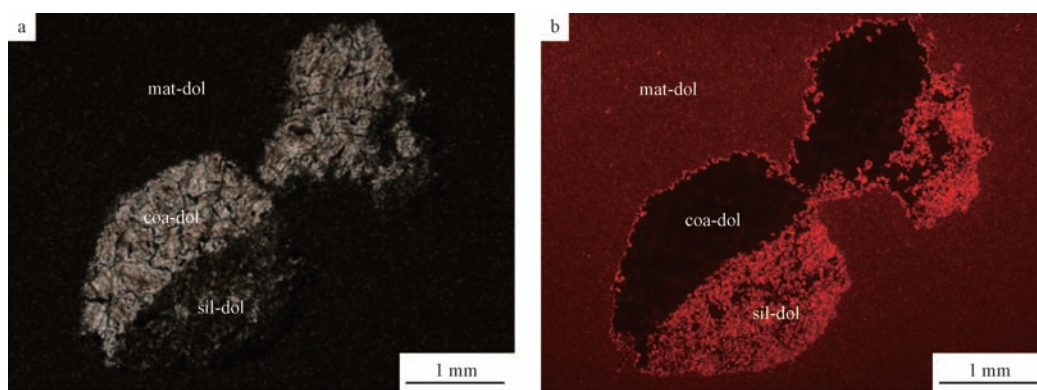


图 6 鄂尔多斯盆地马五段硬石膏结核溶模孔内白云石充填物阴极发光特征

Fig. 6 Cathodoluminescence features of dolomite fillings in mold pores of anhydrite nodules

from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

a, b. 硬石膏结核溶模孔, 白云石充填物, 莲 5 井, 埋深 4 099 m, a 为单偏光, b 为阴极发光

mat-dol. 基质白云石; coa-dol. 粗晶方解石充填物; sil-dol. 粉晶白云石充填物

-2.7‰, $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) 值在 -9.8‰ ~ -11.4‰ (图 5), 粉晶白云石充填物的碳同位素值与基质白云石大致相近, 氧同位素较基质白云石明显的偏负, 可能反映粉晶白云石受到过热水的改造。

另外, 在原始未经改造的硬石膏结核中, 也发育包裹有大量的粉晶白云石 (图 2f), 同样支持粉晶白云石形成于早期, 与基质白云石同时的萨布哈白云岩化作用, 而非淡水成因, 富铁富锰的外边则是受到过后期热流体的影响。

2.3 粗晶白云石

粗晶白云石充填物, 常见于粉晶白云石充填之后的残余空间中, 也能见到粗晶白云石单独充填于整个硬石膏结核溶模孔中, 且常常表现为弯曲的晶面, 正交光下显示为波状消光, 具有鞍状白云石的特征, 可能形成在温度相对较高的流体中, 温度一般大于 80 °C^[20-22]。经染色后, 呈淡蓝色, 为铁白云石 (图 2d, 图 7b)。在阴极发光下, 白云石不发光 (图 6b), 电子探针测点显示, 粗晶白云石具有较高 Fe 和 Mn 含量 (图 4), 但与粉晶白云石相比 Mn 含量则大幅降低, 这是造成阴极发光不发光的原因。Fe²⁺ 只有在较高的温度时, 才能进入白云石晶格^[16-17], 同样也说明粗晶白云石充填物形成于后期温度较高的流体中。粗晶白云石还广泛存在于裂缝中, 其形成可能与断裂相关富 Fe 富 Mn 热流体活动有关。

粗晶白云石充填物的 $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB) 值范围在 -1.7‰ ~ -2.9‰, $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) 值范围在 -9.9‰ ~ -11.3‰ (图 5), 粗晶白云石的碳氧同位素值较基质白云石都明显偏负, 显示了与基质白云石成因差异, 形成过程受到过热水的改造。

2.4 石英

石英充填物, 或与粉晶白云石伴生, 或以单独产出

于硬石膏结核溶模孔隙中。在显微镜下, 多呈自形, 阴极发光下石英不发光。也能见到石英与高岭石 (地开石) 伴生, 甚至在石英中也能见到包裹有大量的高岭石 (图 7a, d)。高岭石一般是在地表或者地表条件下形成, 石英与之伴生, 反映了石英形成于地表或者近地表条件下^[23]。在石英充填物中很难发现两相包裹体, 同样也说明石英的形成温度较低。在马五段岩溶角砾的砾间填隙物中也发现有自形石英的存在。另外, 世界范围内多个碳酸盐岩岩溶型铝土矿层及风化壳中均发现有大量的石英存在^[23]。因而孔隙内充填的石英很可能形成于表生岩溶期大气降水。

3 孔隙充填物形成环境

对不同地区充填物组合类型的统计发现, 盆地南部富县地区以及盆地东部的马五段硬石膏结核溶模孔孔隙充填物以方解石为主, 仅裂缝中可见有少量的铁白云石充填。位于盆地中部的大牛地地区白云石含量明显增多, 但仍主要以方解石充填。盆地西部的苏里格地区则主要以白云石充填为主。由此看见, 充填物类型在不同地区差异, 这可能与盆地的地质背景有一定的联系, 通过前文的论述, 不同类型的充填矿物形成的时间和来源并不相同^[17], 沉积环境、岩溶古地貌以及后期的断裂活动都影响着充填物的分带性。粉晶白云石充填物形成于浅埋藏期, 与沉积环境息息相关, 在盆地东部由于有膏盐湖的存在, 海水盐度较高, 其中形成的硬石膏结核中含有较少的粉晶白云石。因此, 粉晶白云石在盆地内呈现出西多东少的特征。方解石充填物形成于表生岩溶期, 与古地貌关系更明显, 方解石充填物的分布区与前石炭纪岩溶古地貌中的岩溶洼地非常吻合^[18], 在岩溶洼地有较多的淡水汇聚, 使得方解石与粉晶白云石的分布恰恰相反, 在盆地内表现为

东

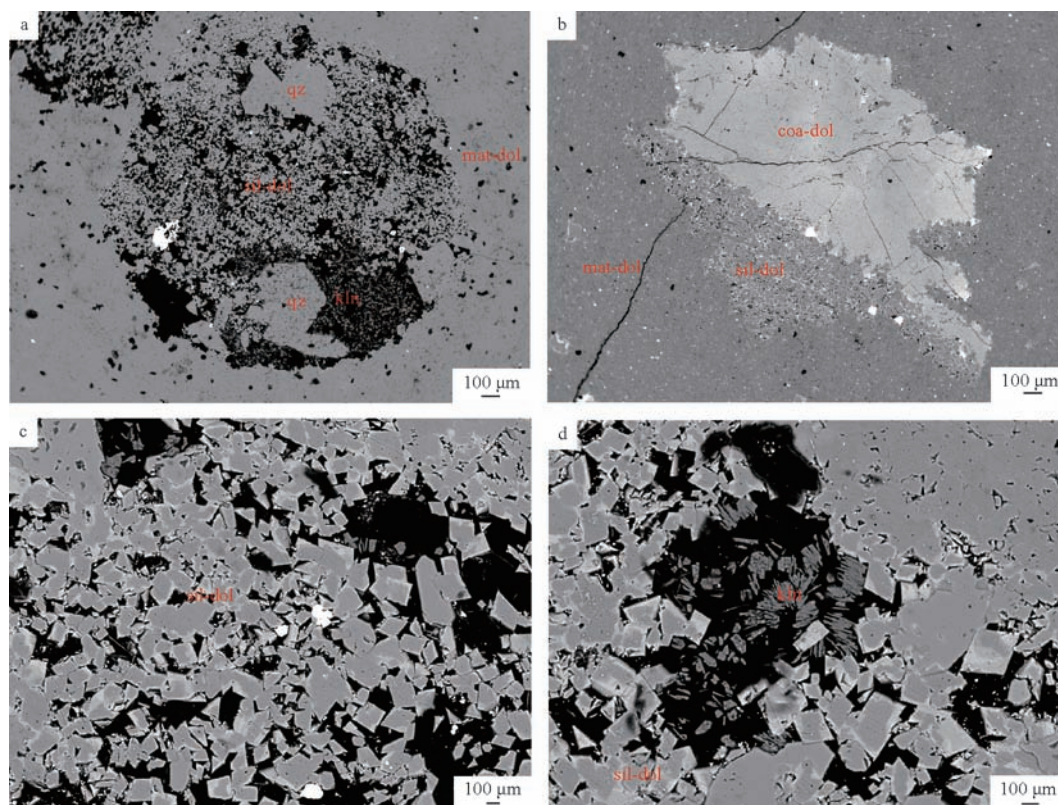


图7 鄂尔多斯盆地马五段硬石膏结核溶模孔内白云石充填物背散射特征

Fig. 7 Backscattering features of pore-fillings in mold pores of anhydrite nodules from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

- a. 硬石膏结核溶模孔, 粉晶白云石、石英和高岭石充填物, 陕338井, 埋深3 799 m; b. 硬石膏结核溶模孔, 粉晶和粗晶白云石充填物, 莲5井, 埋深4 099 m; c. 粉晶白云石充填物, 可分为外边和内部两部分, 陕338井, 埋深3 799 m; d. 粉晶白云石充填物, 高岭石, 陕338井, 埋深3 799 m
qz. 石英; sil-dol. 粉晶白云石; coa-dol. 粗晶白云石; mat-dol. 基质白云石; kin. 高岭石

多西少。石英来源于表生期碳酸盐岩的溶蚀, 其分布的规律性并不明显。而粗晶白云石的形成与后期的热流体活动有关, 可能与断裂活动有关。

在充填物的形成序列上, 粉晶白云石在准同生期—浅埋藏期就已经形成, 分布于硬石膏结核之中, 经暴露风化溶蚀后, 硬石膏被溶解, 在结核中粉晶白云石则残存于硬石膏结核溶模孔隙中。表生期岩溶有发生少量石英以及大量的方解石沉淀, 特别是在大气降水汇集的区域, 孔隙更易被方解石完全充填。再次进入埋藏期后, 热流体的活动造成了部分岩溶期未被完全充填的孔隙发生了粗晶白云石充填, 并使得残存粉晶白云石充填物边缘富集Fe和Mn。

在与储层的关系上, 方解石的充填作用是最主要的储层破坏作用, 淡水充填的区域, 淡水不断汇集, 孔隙往往被完全充填。粉晶白云石的充填对储层的破坏相对有限, 因为硬石膏结核中包裹的粉晶白云石含量相对较少, 经溶蚀残余的粉晶白云石也不足以完全破坏储层的储集性能, 另外粉晶白云石充填物内部也有大量的晶间孔隙。粗晶白云石对残余孔隙的也有一定的破坏作用, 但是由于流体相对有限, 所以往往也会有一点残余孔隙存在。

4 结论

鄂尔多斯盆地马五段硬石膏结核溶模孔内的主要充填矿物有粉晶白云石, 粗晶白云石, 方解石, 石英, 以及高岭石, 硬石膏, 燧石、黄铁矿等, 按充填程度可分为, 未充填、半充填和完全充填。方解石形成于表生岩溶阶段, 与古地貌位置密切相关, 是储层最主要破坏作用, 粉晶白云石的含量与沉积环境相关, 石英形成于表生岩溶期酸盐, 普遍存在一期热流体事件, 表现为粗晶铁白云石的充填和粉晶白云石充填物的边缘的Fe和Mn富集。

参 考 文 献

- [1] Al-Aasm I S, Lonnee J, Clarke J. Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite: examples from Middle Devonian carbonates of the Western Canada Sedimentary Basin [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69(6): 11–15.
- [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 (north-west China): Implications for fault-related fluid flow[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(9): 1428–1440.
- [4] 田雷, 崔海峰, 冯晓军, 等. 麦盖提斜坡奥陶系热液溶蚀流体对内幕白云岩储层的改造作用[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 402–408.
Tian Lei, Cui Haifeng, Feng Xiaojun, et al. Reconstruction effect of the Ordovician hydrothermal dissolution fluid on interior dolomite reservoirs in Maigaiti slope, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 402–408.
- [5] 张涛, 苏玉山, 余刚, 等. 热液白云岩发育模式——以扎格斯盆地白垩系 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 in Taq Taq oilfield, Kurdistan region, Iraq-taking oilfield A in the Cretaceous in Zagros Basin as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 393–401.
- [6] 李映涛, 叶宁, 袁晓宇. 塔里木盆地顺南 4 井中硅化热液的地质与地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 934–944.
Li Yingtao, Ye Ning, Yuan Xiaoyu. Geological and geochemical characteristics of silicified hydrothermal fluids in Well Shunnan 4, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 934–944.
- [7] 张军涛, 胡文瑄, 钱一雄, 等. 塔里木盆地中央隆起区上寒武统—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, Qian Yixiong, et al. Feature and origin of dolomite filling in the Upper Cambrian-Lower Ordovician dolostone of the central uplift, Tarim basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(6): 957–966.
- [8] 张军涛, 胡文瑄, 王小林, 等. 2011, 塔里木盆地西北缘寒武系中热水白云石团块特征及成因研究[J]. *地质学报*, 85(2): 234–245.
Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Wang Xiaolin, et al. Character and origin of Cambrian hydrothermal dolomite conglomeration in the northwestern margin of Tarim basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 234–245.
- [9] 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.
- [10] 包洪平, 杨承运. 鄂尔多斯东部奥陶系马家沟组微相分析[J]. *古地理学报*, 2000, 2(1): 31–42.
Bao Hongping, Yang Chengyun. Study on microfacies of Majiagou formation, Lower Ordovician, eastern Ordos, north China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(1): 31–42.
- [11] 周进高, 张帆, 郭庆新, 等. 鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组障壁潟湖沉积相模式及有利储层分布规律[J]. 2011, 29(1): 64–71.
Zhou Jingao, Zhang Fan, Guo Qingxin, et al. Barrier-lagoon sedimentary model and reservoir distribution regularity of lower-Ordovician Majiagou formation in Ordos basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 64–71.
- [12] 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*, 2011, 29(1): 106–112.
- [13] 丁晓琪, 张哨楠, 潘怀孝, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型岩溶储层发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(2): 210–217.
Ding Xiaqi, Zhang Shaonan, Pan Huaixiao, et al. Development patterns of collapse-type karst reservoirs in the Ordovician of Daniudi gasfield, Ordos Basin. [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 210–217.
- [14] 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]. *石油天然气地质*, 2006, 27(3): 405–411.
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): 405–411.
- [15] 王宝清, 章贵松. 鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系古岩溶储层成岩作用[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(6): 518–528.
Wang Baoqing, Zhang Guisong. Diagenesis of Ordovician paleo-karst reservoir in the Sulige area, the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(6): 518–528.
- [16] 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.
- [17] 李振宏, 胡健民. 鄂尔多斯盆地奥陶系孔洞充填特征分析[J]. *地质论评*, 2011, 57(3): 444–456.
Li Zhenhong, Hu Jianmin. Characteristics of holes filling in Ordovician of Ordos basin[J]. *Geological Review*, 2011, 57(3): 444–456.
- [18] 周义军, 杨遂正, 王欣. 鄂尔多斯盆地奥陶系顶面演化与岩溶储层[J]. *石油物探*, 2011, 45(3): 304–311.
Zhou Yijun, Yang Suizheng, Wang Xin. The structural-interface evolution in Ordovician and karst reservoir in Ordos basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2011, 45(3): 304–311.
- [19] 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2008, 33(1): 26–33.
Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, et al. Cathodoluminescence and diagenesis of the Carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan Basin of China[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2008, 33(1): 26–33.
- [20] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1–3): 1–81.
- [21] Machel H G. Concepts, models of dolomitization; a critical reappraisal [J]. *Geological Society*, 2004, 235(1): 7–63.
- [22] Langhorne B S J, Graham R D. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [23] 姜立君, 王世杰, 刘秀明, 等. 贵州碳酸盐岩风化壳中晶体石英形成条件分析: 氧同位素证据[J]. *矿物学报*, 2009, 29(1): 75–81.
Jiang Lijun, Wang Shijie, Liu Xiuming, et al. Origin of crystal quartz in the weathering crusts overlying carbonate rocks in Guizhou province: evidence from oxygen isotopes[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(1): 75–81.

(编辑 张亚雄)