

文章编号: 1000-0550(2009) 03-0381-09

鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组马五段白云岩的地球化学特征

姚泾利^{1,2} 王保全³ 王 一³ 黄道军² 文彩霞²

(1. 成都理工大学沉积地质研究院 成都 610059 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院 西安 710021;
3. 西南石油大学资源与环境学院 成都 610500)

摘 要 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五段属于浅海碳酸盐层系, 间夹蒸发岩层。盆地中东部通常含有白云岩, 它们是主要油气储集层。一些研究者把它们看成近地表回流白云岩。然而白云岩的岩石学和地球化学表明这些白云岩具有埋藏成因的证据。

马家沟组白云岩(马五段)具有暗红色阴极发光, 微量元素 Fe 为 $5.500 \times 10^{-6} \sim 6.200 \times 10^{-6}$, Mn 为 $170 \times 10^{-6} \sim 210 \times 10^{-6}$, 稳定同位素氧组分为 $-7.093\% \sim -9.932\%$ PDB (平均值为 -8.671% PDB), 稳定同位素锶 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 为 $0.709766 \sim 0.70865$ (有硅质碎屑物的放射性 ^{87}S 的影响)。薄片下可以看到白云石沿着裂缝交代, 上述特征表明白云岩可能在埋藏条件下形成。

白云岩稀土元素的分布模式与海水的稀土元素分布有明显的差别, 缺少 Ce 和 Eu 的负异常, 表明交代流体不会是海水或蒸发海水。包裹体的均一化温度为 $160 \sim 220^\circ\text{C}$, 盐度为 $5\% \sim 25\%$, 暗示白云石化作用温度高, 压力大, 交代流体为卤水。

密西西比谷型 (MVT) 矿化作用 (方铅矿和闪锌矿) 以及共生的低温热液矿物——钾长石、萤石、石英、黄铁矿等表明白云岩具有区域热液特征。

关键词 马家沟组 埋藏白云岩 热液白云岩 地球化学特征

第一作者简介 姚泾利 男 1964 年出生 高级工程师 在读博士 油气地质 E-mail yjl_xq@petrochina.com.cn
中图分类号 P595 P588.24+5 **文献标识码** A

鄂尔多斯盆地地处华北台地的西部 (图 1), 奥陶系马家沟组为内克拉通台地地表海碳酸盐岩沉积。台地内碳酸盐岩沉积物间夹蒸发岩 (硬石膏和盐岩) 沉积, 表明马家沟组沉积期华北台地曾经处于干燥气候条件下的热带海洋环境。碳酸盐沉积物厚度大约为数百米到千余米。鄂尔多斯盆地中东部马家沟组碳酸盐岩岩性上从下到上可以划分为六段 (图 2)。马五段在中东部有白云岩分布, 而且是重要的油气储集层。油气勘探工作积累了大量的地质和地球化学资料, 基于马五段白云岩和蒸发岩共生, 所以一些研究者把它看成是准同生和蒸发回流白云岩。作者近几年来跟随西南石油大学强子同教授对马五段白云岩的岩心进行了系统的岩石学和地球化学研究, 岩石学和地球化学特征表明, 靖边气田马家沟组储层大规模的白云石化是在埋藏条件下发生的, 主要是埋藏白云岩。白云石化交代流体与受基底构造控制来自深部沉积盆地低温热液流体有关。因此靖边气田的白云岩储集相是热液白云岩。回流白云岩可能存在, 但

是大规模的白云石化是与热液相关的。

1 马家沟组马五段白云岩的微量元素

从表 1 中不难看出, 马五段白云岩的微量元素 Fe 和 Mn 的含量比早期近地表成因的白云岩 (准同生和回流) 有相对较高的 Fe 和 Mn 的含量。早期白云岩, 无论是准同生白云石化环境, 还是蒸发的渗透回流白云石化环境, 都是处于氧化环境, 这种环境下, Fe 和 Mn 呈现高价离子状态, 它们不会进入到被交代的白云石的晶格中。低 Fe 和低 Mn 含量是早期白云岩的微量元素一个重要的特征。准同生白云岩和回流白云岩由于缺少 Fe 和 Mn, 所以在阴极射线作用下是一种不发光的矿物 (nonluminescent mineral)。但是马五段白云岩含有极高的 Fe 一定量的 Mn 和低含量的 Sr, 其中 Fe 为 $5.500 \times 10^{-6} \sim 6.200 \times 10^{-6}$, 平均为 5.720×10^{-6} ; Mn 为 $170 \times 10^{-6} \sim 210 \times 10^{-6}$, 平均为 194×10^{-6} ; Sr 为 $30 \times 10^{-6} \sim 51 \times 10^{-6}$, 平均为 37.2×10^{-6} 。在阴极射线下呈现红—浅红色暗淡发光, 说明

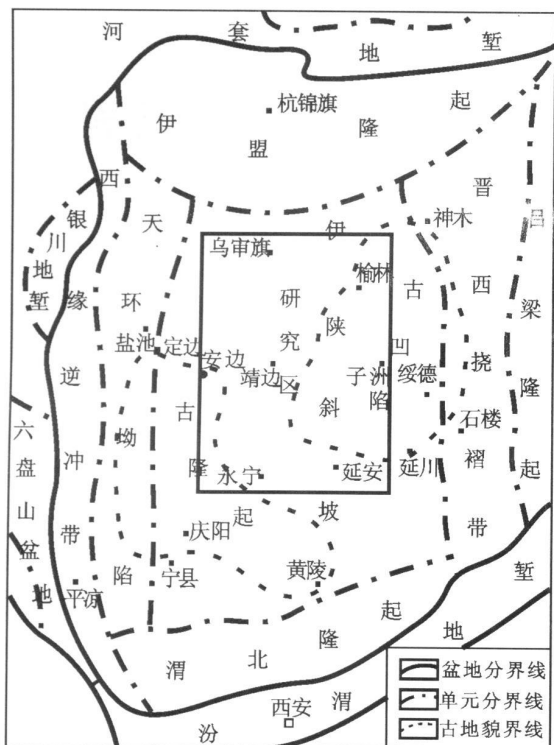


图 1 鄂尔多斯盆地奥陶纪构造单元分区及研究区位置图 (据张吉森等, 1995 内部资料)

Fig 1 Ordovician tectonic units and geographical location of the study area in Ordos Basin (from Zhang Jisen, et al, 1995, unpublished data)

为还原条件。

表 1 马家沟组马五段白云岩的微量元素分析数据 (10^{-6})

Table 1 The trace-element data of dolostone in the fifth member of Majiagou Formation (10^{-6})

井号	Fe	Mn	Sr
陕 8 井	5 800	190	37
	6 200	210	51
	5 600	210	32
	5 500	190	36
	5 500	170	30
变化范围	5 500~ 6 200	170~ 210	30~ 51
平均值	5 720	194	37. 2

马家沟组马五段白云岩含有较高的 Fe 和一定含量的 Mn, Fe²⁺ 和 Mn²⁺ 进入到白云岩晶格中, 显示出还原条件下的产物。这种条件下 Fe 和 Mn 处于二价状态, 因为只有二价状态的 Fe 和 Mn 才有可能取代 CaCO₃ 中的 Ca²⁺。早期蒸发海水条件的准同生白云石化和渗透回流白云岩化是处于氧化状态。只有埋

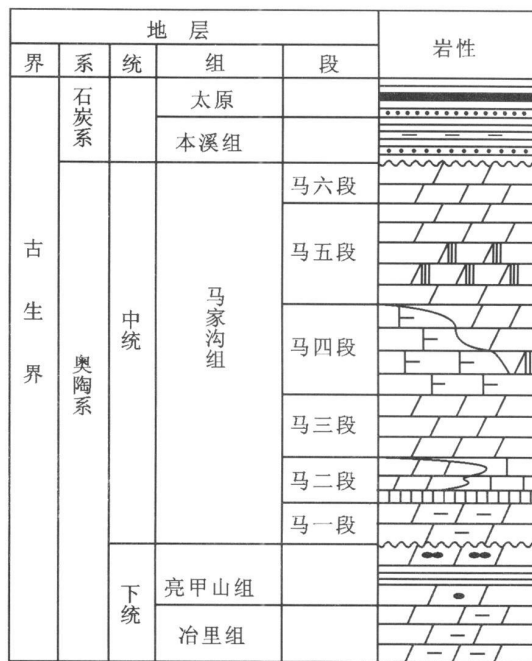


图 2 鄂尔多斯盆地中东部地层划分图

Fig 2 The stratigraphic classification map of the middle eastern Ordos Basin

藏环境才能产生还原条件, 交代流体中的 Fe 和 Mn 才会以二价离子方式出现。因此, Fe、Mn 含量的特征, 使马家沟组马五段白云岩具有埋藏白云岩化的某些特征。马五段 Sr 含量的异常低值也说明成岩流体不大可能是近地表流体, 因为随着埋藏条件下成岩作用的进行, Sr 有流失现象。

2 马家沟组马五段白云岩的稀土元素

鄂尔多斯盆地马家沟组马五段的膏质泥晶云岩和泥晶云岩的稀土元素分析资料表示在表 2 中。图 3 为它们的稀土元素分布特征, 及其与海水、海水交代白云岩、白云石胶结物的对比。

海洋石灰岩是沉积作用过程中由化学和生物化学方式形成的, 而白云岩通常是在沉积作用之后, 碳酸钙沉积物或石灰岩通过白云石化流体交代方式形成的。岩石 (或矿物) 的稀土元素与它们形成时流体或交代流体的流体稀土元素分布有密切关系。这就是说海洋石灰岩的稀土元素分布与海水的稀土元素分布有相似性。

对白云石来说, 交代流体不同, 它们有不同的稀土元素分布。准同生白云岩、渗透回流白云岩以及海水白云岩, 交代和反应形成的流体是海水和蒸发海

水,它们的稀土元素分布与海水的稀土元素分布类似。埋藏白云岩交代流体是地层的压实流体——地层水。它可以是海水,也可以是地层卤水,甚至还有来自岩浆的残余液体和气体。它们的稀土元素分布可以类似于海水的稀土元素分布,也可以不同于海水稀土元素的分布。

表 2 马家沟组马五段泥晶云岩和膏质泥晶云岩的稀土元素特征 (10^{-6})

Table 2 Characteristics of rare earth elements of dolomitic and creaming dolomitic in the fifth member of Ma jiagou Formation

样品号	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb
282	0.093	0.083	0.090	0.090	0.100	0.098	0.080	0.070	0.070
291	0.073	0.050	0.037	0.047	0.087	0.076	0.073	0.057	0.050

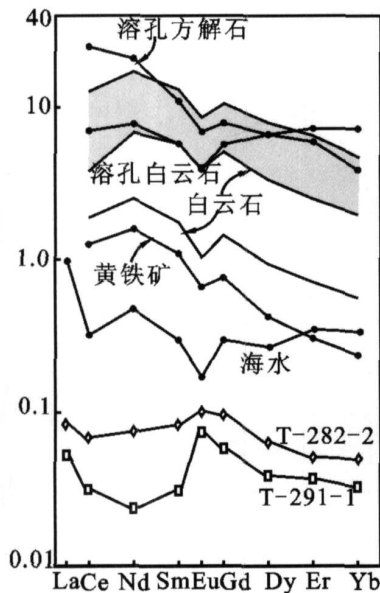


图 3 马家沟组马五段泥晶云岩和膏质泥晶云岩的稀土元素与海水、海洋石灰岩、海水有关白云岩,以及成岩白云岩稀土元素的对比(对比资料来自 Burlington-Keokuk 组晚期充填溶孔碳酸盐和裂缝充填物及黄铁矿的稀土元素)

Fig 3 Comparison of rare earth element between dolomitic and creaming dolomitic in the fifth member of Ma jiagou Formation, the seawater limestone, dolomite about seawater and diagenetic dolomite (the data are from the earth element of carbonate filled in dissolution pore, fracture filling and pyrite on the latter Burlington-Keokuk Formation)

马家沟组马五段的膏质泥晶云岩和泥晶云岩的晶粒细,有蒸发盐沉积,似乎是属于早期准同生和回

流白云石化作用形成的白云岩,其稀土元素分布应当与海水的稀土元素分布相似。然而它们却与海水和海水有关的白云石化形成的白云岩的稀土元素分布有明显的差异。稀土元素分布的丰度,总的比海水和海水有关的白云岩的丰度要低,其中,轻稀土元素丰度相对较低,重稀土元素分布较高。Ce 和 Eu 的负异常消失或者缺失 Ce 和 Eu 负异常,稀土元素的特征不但与海水、海洋碳酸盐及海水沉积物有不同稀土元素分布,甚至与成岩胶结物白云石也存在一定的差异。这就意味着马家沟组马五段白云岩不是准同生或回流白云岩。

3 碳、氧稳定同位素特征

地质历史中海水的碳、氧的稳定同位素值是有变化的,奥陶纪海水胶结物的稳定同位素值大约为 $\delta^{18}O = -6.5\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$, $\delta^{13}C = -2.0\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$ [1-3]。据一些研究者研究,奥陶系马家沟组马五段白云岩属于干燥气候下蒸发环境形成的准同生和渗透回流白云岩。根据同位素分馏作用的原理,蒸发作用使得相对较轻同位素水蒸发掉了,相对重同位素水留在蒸发水中,这种动力学同位素分馏会导致蒸发海水的稳定同位素比正常海水的稳定同位素更要偏正一些,因此,准同生白云岩和渗透回流白云岩的稳定同位素氧值应当比海水白云岩和海洋胶结物要偏正一些,比埋藏白云岩和混合水白云岩更要偏正。

从图 4 中可以看出,马家沟组马五段白云岩的稳定同位素碳、氧值分布在碳、氧十字图的左侧,明显比奥陶纪海水偏负,具典型的埋藏特征;图 5 中,所有样品的碳、氧值均在 Allan 和 Wiggins 的高温白云石区 [4],即埋藏白云岩分布区。这就是说,从稳定同位素地球化学资料来看,马家沟组马五段白云岩具有埋藏白云岩或高温白云岩的特征。准同生和回流白云岩是一种欠稳定富 Ca 的白云石,在埋藏作用过程中要发生稳定化作用, C、O 同位素会有变化,然而要跨越海水白云石和海水胶结物的 O 同位素这样大的变化是绝对不可能的。马五段白云岩孔洞充填的白云石胶结物,特别是鞍状白云石胶结物的氧稳定同位素具有与基质白云石一模一样的特征,这充分说明形成鞍状白云石的成岩流体与基质白云石化的成岩流体是同一来源。鞍状白云石是典型的埋藏和热液成岩作用的产物,这就更进一步说明基质白云石化的流体不是近地表来源的。

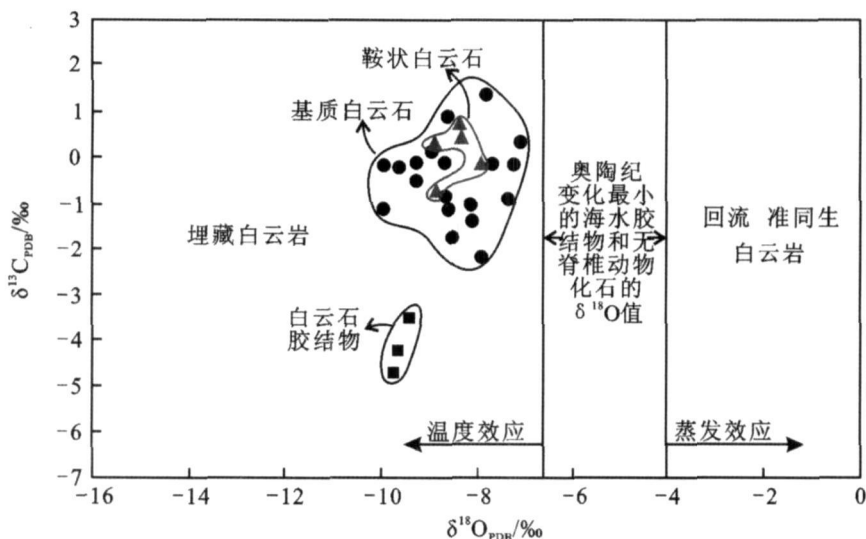


图 4 马五段基质白云石和胶结物碳、氧同位素分布,与奥陶纪海水比较。样品值落在埋藏白云岩区

Fig. 4 Compared with the seawater of Ordovician period, the carbon and oxygen isotope data of matrix dolomite and cement in the fifth member of Majiagou Formation is in the burial dolostone area

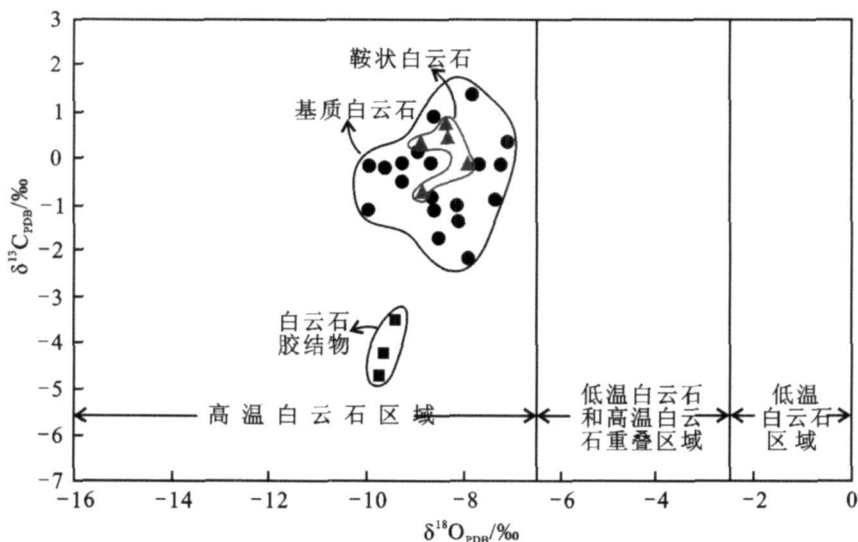


图 5 马五段基质白云石和胶结物碳、氧同位素分布,与统计的高、低温白云石比较。样品值落在高温白云石区域

Fig. 5 Compared with the statistical high and low temperature dolostone, the carbon and oxygen isotope data of matrix dolomite and cement in the fifth member of Majiagou Formation is in the high temperature dolostone area

4 马家沟组马五段白云岩锶同位素

马五段白云岩稳定同位素锶分析的资料概括在表 3 中。从表 3 中不难看出,马五段白云岩的稳定同位素的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在分析的资料中绝大部分都大于奥陶纪时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (图 6)。应该怎样来解释马五段白云岩同位素锶的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的地球化学特征呢?

(82.53%)、 ^{87}Sr (7.04%)、 ^{86}Sr (9.87%)、 ^{84}Sr (0.56%)。其中 ^{87}Sr 和 ^{86}Sr 在丰度上比较类似。通常地球化学家把 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值用来表示稳定同位素锶的地球化学特征。这两种锶的同位素在成因上是不一样的,是有不同来源的。 ^{87}Sr 是放射性成因的,是 ^{87}Rb 放射性衰变形成的,其半衰期接近 500 亿年。相反, ^{86}Sr 为非放射性成因。天然的 ^{87}Rb 是放射性同位素,经过核裂变转变成稳定同位素 ^{87}Sr 。地壳结晶分异作用会造成高的 Rb 含量,它们很容易交代钾长石

众所周知,自然界中锶有 4 种同位素组分: ^{88}Sr

和粘土矿物中的 K。这就造成花岗岩、闪长岩以及长石岩组成的老的硅铝酸盐岩壳中富含 Rb。大陆壳富 Rb 会造成地幔物质中 Rb 相对减少。地幔在硅铁岩中具有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.05) 已经得到明显的反映, 相反, 大陆壳高的 Rb 组分在铝硅酸盐岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.716) 得到证实^[5]。

表 3 奥陶系马家沟组马五段白云岩锶同位素比值

Table 3 The Sr isotope ratios of dolostone in the fifth member of Ordovician Majiagou Formation

样品号	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (马五段)	奥陶纪海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	膏质泥晶云岩	0.70876	
2	膏质泥晶云岩	0.70868	
3	膏质泥晶云岩	0.70879	0.70878 [*] (平均)
4	泥晶云岩	0.70882	(海水胶结物,
5	泥晶云岩	0.70890	Montanéz等, 1992)
6	泥-粉晶云岩	0.70902	(0.7087~0.7086 Burke, 1982)
7	泥晶云岩	0.70906	
8	泥晶云岩	0.70912	
9	泥-粉晶云岩	0.70923	
10	泥-粉晶云岩	0.70945	
11	泥-粉晶云岩	0.70977	

☆ - 奥陶纪海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比资料来自 Burke 等 (1982)、Montanéz 和 Read (1992)。

碳酸盐沉积物是从海水中沉积的, 因此它是从海水中获得锶的。据许多研究者研究, 海水中锶的稳定同位素有两种来源: 一是大陆; 二是洋中脊玄武岩和海底裂开海水同它们之间的反应。大陆老地盾中的火成岩、变质岩、铝硅酸盐岩的侵蚀作用提供放射性的 ^{87}Sr 进入到海水中。洋中脊玄武岩和海水发生反应把非放射性的锶提供到海水中。一个地质时期的海水中锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值可以大致看成是恒定的。地质时期由于造山运动和海底扩张会造成两种供应来源的变化, 这就会造成海水锶同位素周期性的变化, 但是就某一地质时期来说, 海水锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相对来说是恒定的。

奥陶系马家沟组碳酸盐岩沉积时期海水锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值大约为 0.7087^[6]。马家沟组碳酸盐岩是从这样的海水中沉积的, 因此它们的锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 大致相当于这个海水的锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。然而, 马五段白云岩就不一样了, 因为白云岩是一种成岩相, 它是马家沟组碳酸盐岩沉积物或岩石被白云石化流体交代形成的。如果交代流体是海水、蒸发海水, 例如准同生白云岩和蒸发回流白云岩, 那么白云岩的锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 应当与海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相当。如果交代

流体是埋藏条件下地层卤水, 那么这种白云岩锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 应当比海水锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值要高, 因为地层卤水在地下通过硅质碎屑沉积层时, 有放射性锶 ^{87}Sr 进入到流体中。这种流体交代碳酸盐岩时, 当然就会有放射性 ^{87}Sr 的混入。所以白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高, 表明白云石化是在埋藏条件下进行的。表 3 和图 6 中显示出来的马五段白云岩的锶稳定同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值一般比当时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值要高, 这一事实表明马五段白云岩不大可能是回流白云岩和准同生白云岩, 应当是埋藏白云岩的地球化学特征。

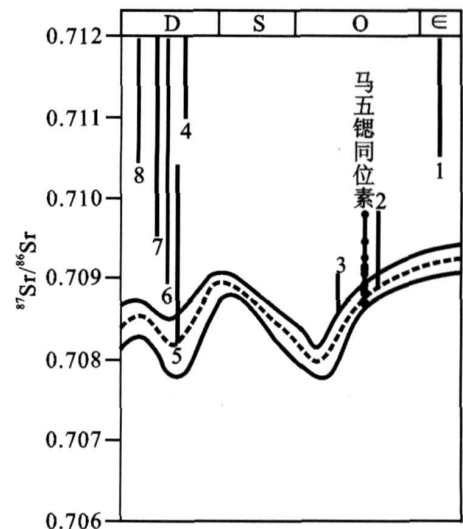


图 6 奥陶系马家沟组马五段白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与中奥陶世海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值对比图 (1~8 为加拿大西部和美国东部古生代地层中的埋藏白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成 (Allan 和 Wiggins, 1993; Davies 和 Smith Jr., 2006))

Fig 6 Comparison diagram of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio between dolostone in the fifth member of Majiagou Formation of Ordovician and seawater of the Middle-Ordovician

马五段白云岩溶孔中方解石胶结物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 小于中奥陶世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 这是什么含义? 怎么解释呢? 这必须与马家沟组的埋藏史结合起来讨论。方解石胶结物是在埋藏作用过程中形成的, 在经历 S₁、D₁、C₁ 的侵蚀之后, 在石炭系本溪组和太原组海相和海陆交互沉积时, 当时的海水是在 0.7068~0.7085 之间变化, 它们小于下奥陶世海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。这就意味着当马家沟组埋藏时期, 有 C、P 海水有关的流体作用, 这个时期在溶孔中形成的方解石胶结物, 具有比马家沟期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值要低当然是一种自然现象。这一现象受到有机地球化学资

料的支持。有的井的气来自 C、P 页岩生油层, 这种流体向下运动, 而马家沟组油成气也可以向上运移, 所以流体也可以向上运移。油气的运移是要靠流体来驱动的。这就表明埋藏过程中, 马家沟组流体曾向上流动, 而 C、P 流体也曾经向下流动过。

马家沟组白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比海水要高, 除交代流体是地层卤水外, 与 S-C₁ 侵蚀时期的大气淡水也有关系, 因为淡水经过硅质碎屑时, 也会有 ^{87}Sr 进入到流体中。然而, 侵蚀期地表水流经地区主要是碳酸盐岩, 所以淡水效应必定不会是很大的。

5 白云岩溶孔共生的方解石和白云石包裹体的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系

从图 7 中不难看出, 这些与白云石共生的方解石形成的流体不会是奥陶纪海水的蒸发作用的卤水。

这种流体有深部温度较高的来自基底的变质作用水, 或者还有岩浆作用水(靠近岩浆作用水)。由于方解石和白云石是共生的, 它们与白云石化作用时流体有密切关系。因而, 白云石化流体是来自深地下, 与基底断裂有关的温度高(160~180°C, 包裹体资料)、压力较大的沉积低温热液流体, 通过断裂作用由下而上的运动交代马家沟组马五段碳酸盐岩而形成热液白云岩。

6 流体包裹体资料及其解释

流体包裹体分析可以揭示成岩作用过程中流体的物理化学性质, 根据分析得出的均一化温度、盐度等资料可以对成岩环境作出判断。已经有很多研究者对鄂尔多斯盆地马家沟组马五段段的流体包裹体进行过系统分析, 马五段的白云石、石英、方解石等晶

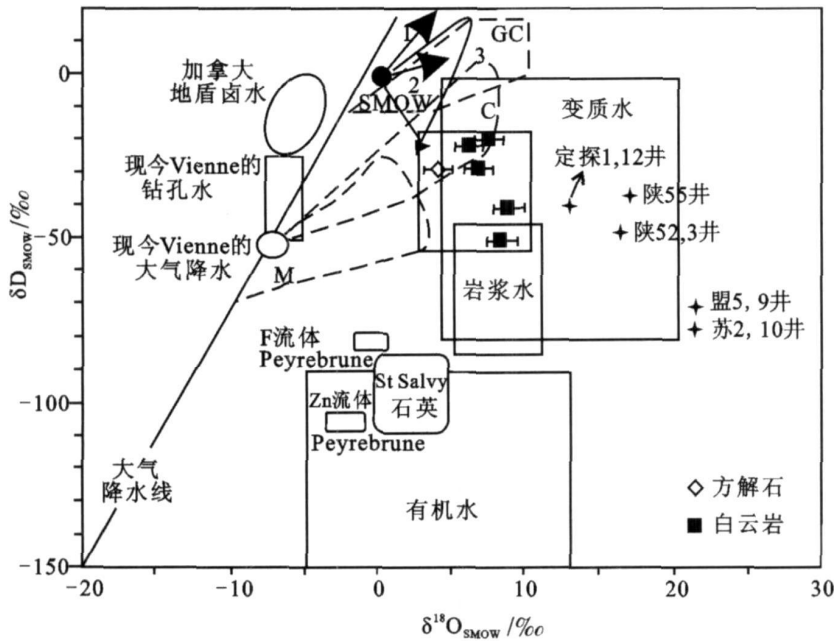


图 7 1. 代表潮湿气候下原生海水蒸发作用的趋势; 2 代表干燥气候下原生海水蒸发作用的趋势; GC 为墨西哥湾沿岸海水蒸发趋势。图上还表示有加拿大地层的卤水以及法国 Aquitaine 盆地海相 Lias 和 Dogger 组 (三叠世) 裂缝和洞穴充填的方解石和白云石形成时的卤水。盆地东南边 Peyrebrune Zn 矿化作用时的流体。来自基底的变质作用水分布资料和岩浆水的资料引自 Sheppard (1984, 1986)。有机质水分布引自 Sheppard 和 Charef (1986)。3 表示 Aquitaine 盆地中 Vienne 钻孔中现今取的水样的蒸发曲线。Lias 和 Dogger 组裂缝和溶孔中充填方解石和白云岩投影在变质水和岩浆水中。鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩溶孔中充填的方解石投影在变质作用的水中

Fig 7 1. showing the trend of evaporation of raw sea water in the humid climate; 2 showing the trend of evaporation of raw sea water in the drying climate; GC is the trend of seawater evaporation along the Gulf Coast. The figure also shows the brine in Canada Formation, the brine formed when calcite and dolomite filled in fracture and cave in Lias and Dogger Formation in Aquitaine Basin, France and the fluid produced when mineralisation of Peyrebrune Zn occurs in the southeast of the basin. The metamorphic water distribution data and magmatic water of base is from Sheppard (1984, 1986). Organic water distribution is from Sheppard and Charef (1986)

体中都观察到两相流体包裹体的存在。两相含水流体包裹体在研究区的白云岩中可以观察到,这就暗示白云石是在大于 50℃ 以上的温度被交代的,或者沉淀的 (Goldstein 和 Reynolds 1994)。

来自研究区位置的白云石、石英、方解石中的流体包裹体中获得均一化温度的测定范围为 160 ~ 220℃,含盐度范围为 5w % ~ 25w % (图 8 图 9)。

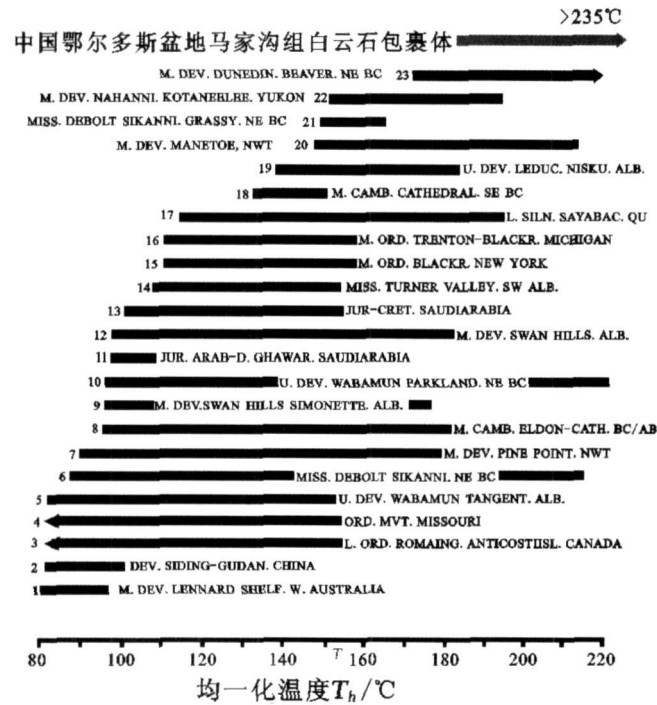


图 8 马五段白云石中两相流体包裹体均一化温度范围与全球资料对比图

Fig 8 The comparison diagram of two phase fluid inclusion homogenization temperature of the dolomite between the fifth member of Majiagou Formation and the global data

当白云石交代或沉淀时有圈闭的两相流体包裹体存在,这种流体包裹体均一化作用时温度变化范围为 160~ 220℃,这种包裹体的均一化温度显示原来的岩石是暴露在白云石化作用时的温度变化范围内 (图 8)。

白云石中的包裹体测定的含盐度范围为 5w % ~ 25w %,大于海水的含盐度,如果说这种含盐度的变化是由于蒸发作用造成的,那么均一化温度不应该达到这么高,所以说这种高盐度卤水不会是蒸发来源。

7 痕迹密西西比谷型 Pb—Zn 矿 (MVT)

马家沟组白云岩中,有时可以见到痕迹的密西西比谷型的 Pb—Zn 矿的共生矿物,这些矿物有方铅矿

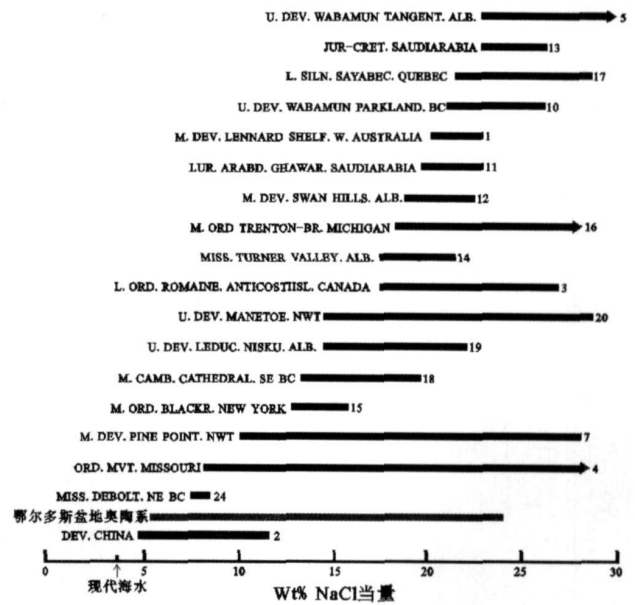


图 9 马五段白云石流体包裹体含盐度范围与全球资料对比图

Fig 9 The comparison diagram of salinity of fluid inclusion of dolomite between the fifth member of Majiagou Formation and the global data

和闪锌矿、萤石、正长石、石英、黄铁矿等 (陕 2 井)。这些矿物出现,表明热液白云石化流体是一种“低温热液”,并进一步证明上述岩石学和地球化学特征具有热液作用的某些标志。

8 靖边气田——热液白云岩气田

上述岩石学和地球化学的资料证明鄂尔多斯地区靖边气田奥陶系马家沟组马五段白云岩是热液白云岩,靖边气田是热液白云岩气田。该气田近于南北向呈窄长形条状分布。出现在奥陶系侵蚀面上“岩溶台地”与“岩溶盆地”(岩溶术语)之间的洼地 (sag) 中。洼地中雁行式的构造、里德尔剪切以及气田的线状分布显示出构造控制热液白云岩和构造控制热液白云岩气田分布的特征 (图 10)。

热液白云岩和热液白云岩油气田的构造控制模式, Davies 和 Smith 做过综述。在拉张性或扭张性的基底断层作用下,来自深部沉积盆地的“沉积低温热液”(有岩浆作用和变质作用的残余气体和液体渗入),沿着基底断层向上移动,并交代碳酸盐岩层系,形成热液白云岩。这种热液白云岩可以作为“密西西比谷型铅锌矿 (MVT)”的母岩,同时也可以作为油气的储集相 (HTD) [7~ 10]。

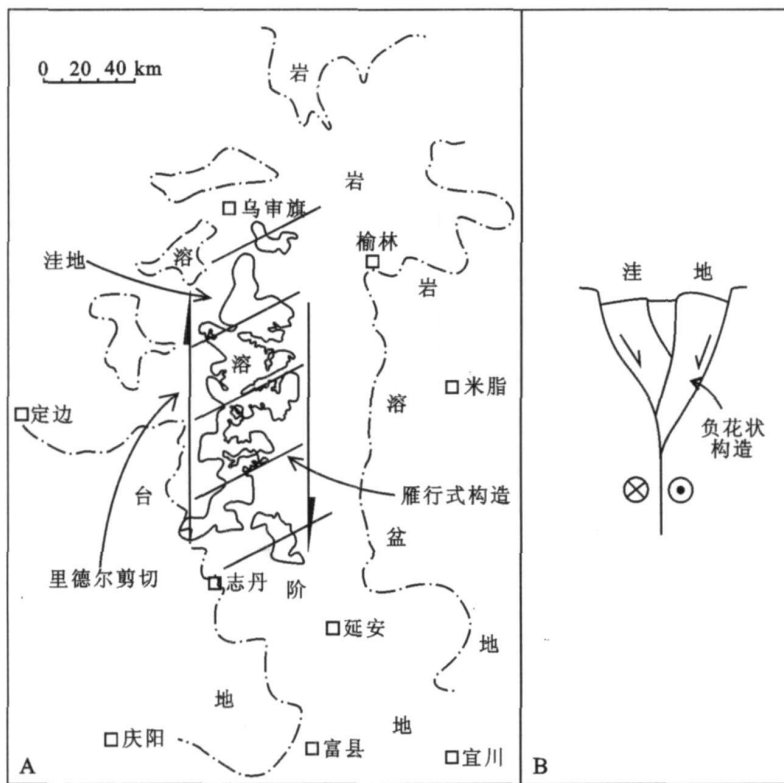


图 10 靖边气田的构造模型图

奥陶系与石炭—二叠系页岩界面上靖边气田显示出雁行式构造特征和里德尔 (Riedel) 剪切。靖边气田出现在岩溶台地和岩溶盆地的窄长条形过渡带——榆林靖边岩溶阶地上。区域地质的资料表明鄂尔多斯地区处于克拉通稳定台地时期, 奥陶系马家沟组沉积后, 台地在 O_3 、S、D、C 处于稳定上升夷平时期, C、P 沉积前有岩溶发育, 但主要表现在地下而不在地表。现在地形——即岩溶台地和岩溶盆地以及过渡带 (长条形) 岩溶阶地, 是由于 C、P 纪时基底断裂作用形成的。基底断裂带正是现在的岩溶阶地。基底断裂作用时有热液活动和热液白云岩 (HTD) 和 MVT 痕迹的 Pb—Zn 矿形成。

Fig. 10 The schematic map of structure in the Jingbian Gas Field

The shale interface between Ordovician and Carboniferous-Pennsylvanian of the Jingbian Gas Field show the Echebn structure character and Riedel shear. Jingbian Gas Field is located in the elongated belt of transition zone between karst mesa and karst basin karst terrace of Jingbian in Yulin. Areal geological data indicated Ordos area on the craton stages and after the stratum of Majiagou Formation of Ordovician deposited, the mesa was on the steady raising and leveling stage on the O_3 , S, D, C periods karst developing before C, P deposited but which were mostly showing underground, not surface. The genesis of the current terrain—karst mesa, karst basin and transition zone karst terrace were because of basement rifting during Carboniferous and Pennsylvanian. The basement rift belt is the karst terrace now. Hydrothermal activation and Pb—Zn formation are the evidence of the Hydrothermal dolostone (HTD) and MVT when basement rifting occur.

从图 10 中不难看出由于南北向的拉张, 或扭张性的基底断层的作用, 并在断层上部边界形成一个负花状构造。这种负花状构造是在断层交界处, 平面上的特征是一个洼地, 在洼地内有雁行式构造特征。这种雁行式的构造是由于基底断层走向上的滑动, 或断层的扭动, 衍生出来的里德尔剪切造成的^[7]。靖边气田分布在南北向的洼地内。这与北美奥陶系 Trenton-Black River 组热液白云岩油气沿着基底断裂走向的洼地内分布完全是一致的^[7]。

Davies 和 Smith^[7]认为, 洼地 (sag) 在构造上是低地, 然而, 就热液白云岩储集相来说它是一个正性高地。靖边气田分布在构造洼地内, 同样从热液白云岩

这种岩性圈闭体来说它也是一个正性高地, 所以它能圈闭油气。

不是任何条件下基底断层都可以形成热液白云岩和热液白云岩油气田。从地层关系上可以看出, 热液白云岩形成时下伏的长城石英砂岩储库作用和上覆 C—P 的泥质沉积物的封堵作用的重要性。长城石英砂岩, 在鄂尔多斯地区的西部和南部其厚度可以达到 1 500 m 到近于 2 000 m, 台地内也有 500~ 800 m。它是深盆地内低温热液和含 Mg 卤水的储库。上覆 C—P 泥质沉积物 (页岩) 的重要性就是起到一个封堵作用。

地震剖面上负花状构造和洼地的识别, 三维地震

在平面上识别基底断裂走向滑动和扭动衍生的里德尔剪切产生的雁行式的构造是寻找热液白云岩油气田的行之有效的办法。

9 结论

岩石学、地球化学以及构造学的资料表明靖边气田马家沟组马五段白云岩具有明显的热液白云岩的特征,回流白云石化作用的解释与这些资料不相符合。靖边气田是热液白云岩油气田,其特征是明显的受构造控制。在鄂尔多斯地区应用地震勘探技术寻找类似这种类型的油气田不乏是一种行之有效的方法。

参考文献 (References)

- 1 Popp B N, Anderson T F, Sandberg P A, *et al* Brachiopods as indicators of original isotopic composition in some Paleozoic limestone [J]. *Bulletin of Geological Society of America* 1986 97: 1262-1269
- 2 Lohmann K R, Walker J C G. The $\delta^{18}\text{O}$ record of Phanerozoic abiogenic marine calcite cements [J]. *Geophysical Research Letters* 1989 16: 319-322
- 3 Montañez I P, Read J F. Fluid-Rock interaction history during stabil-

- zation of early dolomite, Upper Knox Group (Lower Ordovician) [J]. *Journal of Sedimentology* 1992, 62(5): 253-278
- 4 Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs: geochemical techniques for evaluating origin and distribution [J]. *AAPG Continuing Education Course Note Series* 36, 1993
- 5 Veizer J. Strontium isotopes in seawater through time [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 1989 17: 141-167
- 6 Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, *et al* Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time [J]. *Geology* 1982, 10: 516-519
- 7 Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. *AAPG Bulletin* 2006 90 (11): 1641-1690
- 8 Woodcock N H, Fisher M. Strike-slip duplexes [J]. *Journal of Structural Geology* 1986 8(7): 725-735
- 9 Sibson R H, Faulting and fluid flow [C] // Nesbitt B E, eds. *Fluids in Tectonically Active Regimes of the Continental Crust*. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook 1992, 18: 93-132
- 10 Zolnai G. Continental wrench-tectonics and hydrocarbon habitat [J]. *AAPG Continuing Education Course Notes Series* 30 2d ed unpaginated 1991

Geochemical Characteristics of Dolomites in Lower Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin

YAO Jing-li^{1,2} WANG Bao-quan³ WANG Yi³ HUANG Dao-jun² WEN Cai-xia²

(1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

(2 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oil Field Company, PetroChina, Xi'an 710021;

3 Southwest Petroleum University, Chengdu 610500)

Abstract Lower Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin is a shallow marine carbonate sequence with evaporate stratum. The central-western part in the basin often contains several dolomite units, which are major reservoir rock. Some researchers considered them as reflux dolomite near surface. However, petrography and geochemistry of dolomite suggest that this dolomite have evidence of burial origin.

Majiagou dolomite (M_5) included dull-red cathodoluminescence, trace element of 170 ~ 210 ppm for Mn and 5500 ~ 6200 ppm for Fe, stable isotopic oxygen composition of -7.093 ~ -9.932 PDB, the average is -8.671 PDB, formatrix and vug-filling saddle dolomite and bright dolomite cement, stable isotopic strontium composition of 0.709766 ~ 0.70865 for $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (influenced by silica-clastics materialities, sea water). Dolomite replaced host rock along the fractures in the section. These data about Majiagou dolomite (M_5) was formed in the burial condition.

REE pattern of dolomite are distinctly different from seawater, commonly are short of negative anomaly of Eu and Ce, such distinct REE signatures probably reflected interaction between diagenetic fluid and host rock and siliciclastic material. Homogenization temperature of 160°C ~ 220°C, salinity of 5w% ~ 25w%, suggest dolomitization occurred at high temperature and larger pressure, replacing fluids is brines.

The pervasive dolomite, trace MVT mineral (sphalerite, galena and iron sulfides), potassium (K)-silicate mineral (K-feldspar), quartz, volcanic tuffs in these rock, which preserve a regional hydrothermal signatures.

The petrography and geochemistry of Majiagou dolomite show that this dolomite (M_5) has evidence of hydrothermal dolomite (HTD) and central field (gas) are now identified to be of HTD type, typically with a strong structural control on localization.

Key words Majiagou Formation, burial dolomite, hydrothermal dolomite, geochemical characteristics