

The Rationality of Mixed Water Dolomitization and Buried Dolomitization*

——Taking the Genesis of Dolostone of Feixianguan Formation in the Sichuan Basin as an Example

Meng Ning¹, Binbin Hao¹, Jiuyuan Zhang¹, Bin Zhang¹, Zhonggui Hu^{1,2}

¹School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan

²Key Laboratory of Exploration Technologies of Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou
Email: dianerliu@yahoo.com.cn

Received: Oct. 19th, 2012; revised: Nov. 3rd, 2012; accepted: Nov. 18th, 2012

Abstract: Although researches on dolomite have been lasting for more than 200 years, there are still many disputes about the genesis of dolostone, and nowadays' domestic researches in this field just confine to mechanical application of foreign dolomitization models. Taking part of dolostone of Feixianguan Formation in the Sichuan Basin as an example, early researchers tended to consider it as the result of mixed water dolomitization, while in recent years, some scholars came up with the idea of buried causes and studied dolomitization fluids carefully. Based on the discussion of the petrological and geochemical characteristics of dolostone in Feixianguan Formation, this study analyzes the clashes of these two types of genetic model of dolostone, hoping to work out the rationality of mixed water dolomitization and buried dolomitization, which will provide a reference for further research on dolostone genesis.

Keywords: Mixed Water Dolomitization; Buried Dolomitization; Feixianguan Formation

混合水白云石化和埋藏白云石化作用的是与非*

——以四川盆地飞仙关组白云岩成因为例

甯 濛¹, 郝斌斌¹, 张九园¹, 张 彬¹, 胡忠贵^{1,2}

¹长江大学地球科学学院, 武汉

²长江大学教育部油气资源与勘察技术重点实验室, 荆州
Email: dianerliu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012年10月19日; 修回日期: 2012年11月3日; 录用日期: 2012年11月18日

摘 要: 人们对白云石的研究已有 200 多年的历史, 但关于白云岩的成因仍然存在很大的争议。目前国内对白云岩成因的研究主要停留在对国外提出的白云石化模式的套用阶段。以四川盆地飞仙关组部分白云岩成因为例, 早期学者多倾向于用混合水白云石化模式解释其成因, 近几年又有学者提出了埋藏成因, 并对其白云石化流体性质作了具体研究。本文以四川盆地飞仙关组白云岩为例, 从引发飞仙关组白云岩成因争议的岩石学特征、地球化学特征展开讨论, 分析这两种成因模式的争议点所在, 以期寻找到混合水白云石化和埋藏白云石化作用的是与非, 为更进一步研究白云岩的成因提供一定参考。

关键词: 混合水白云石化; 埋藏白云石化; 飞仙关组

*基金项目: 长江大学“国家大学生创新性实验计划项目”(项目编号: 1104)和湖北省自然科学基金项目(项目编号: 2011CDB005)资助。

1. 引言

四川盆地东北部飞仙关组为一套浅海相碳酸盐岩台地沉积，在陆表海台地上沉积了一套浅海碳酸盐岩，间夹蒸发盐层。岩性以鲕粒灰岩、鲕粒白云岩和藻纹层白云岩为主^[1](图 1)。其白云岩类型丰富，按形成环境可分为两大类：局限-蒸发台地和台缘鲕滩环境。局限台地环境形成的白云岩类型包括：泥-微晶白云岩、藻纹层白云岩和粉-细晶白云岩，在开江-梁平海槽东部发育较好，分布面积广。鲕滩环境形成的白云岩类型包括：具残余鲕粒结构的粗粉晶-细晶白云岩、鲕粒白云岩，主要分布在开江-梁平海槽东部边缘的罗家寨-渡口河-铁山坡一带，海槽西部边缘不发育^[2]。

对四川盆地飞仙关组白云岩成因机理或模式，不

同学者有不同的解释。目前主要的成因解释有准同生(蒸发泵)、混合水和埋藏等白云石化模式。其中准同生白云石化模式用来解释泥-微晶白云岩类，此种观点没有争议^[3]；而对于混合水^[4-6]和埋藏白云石化作用^[3,7-9]模式的应用具有较大分歧，此两种模式常用来解释分布于台缘鲕滩环境的飞仙关组优质储集岩类——鲕粒白云岩、具残余鲕粒结构的粗粉晶-细晶白云岩的成因。本文主要基于前人的研究成果和最新的研究进展，从沉积环境、岩石学特征及地球化学特征方面对这两种成因模式的相应证据展开讨论。

2. 形成环境

研究区早三叠世总体的古地貌特征是长兴末期区域构造抬升和热构造沉降与拗陷活动继承发展的结果^[3]。川东北地区的台盆硅质岩相受飞仙关期水体变浅的影响而逐渐消失，演变为深水台盆相与浅水台地相交替的沉积相展布格局，为典型的台-盆(槽)沉积体系。根据威尔逊模式，可将沉积相自开江-梁平海槽向东西两侧依次划分为：盆地相-斜坡相-台缘鲕粒滩相-开阔台地相-局限台地相-蒸发台地相^[7]。从理论上讲，这种环境既有利于混合水白云石化作用的发生，也能在后期的埋藏中发生埋藏白云石化作用。

2.1. 混合水白云岩的形成环境

混合水白云岩(鲕粒白云岩和具残余鲕粒结构白云岩)主要见于飞仙关组台缘鲕滩环境中，因为在台地边缘的转折带，水动力强，容易形成鲕滩。鲕滩在沉积过程中形成向上突起的正地貌，易暴露于海平面之上。在淡水透镜体以下的半咸水带中，岩石就会发生混合水白云石化作用。鲕滩的发育受控于海平面的变化：当海平面上升时，鲕滩开始形成并接受沉积；当海平面下降时，向上凸起的鲕滩能暴露与海平面之上，在大气淡水和海水的共同作用下，形成半咸水带。当混合水的比例在 5%~30% 范围内时，就可发生混合水白云石化作用。随着海平面周期性地升、降，鲕滩不断接受沉积向上生长，或暴露于大气发生白云石化作用，从而使鲕滩发生较大规模的混合水白云石化作用^[10]。

2.2. 埋藏白云岩的形成环境

对于同样一套台缘鲕滩白云岩，持埋藏白云石化

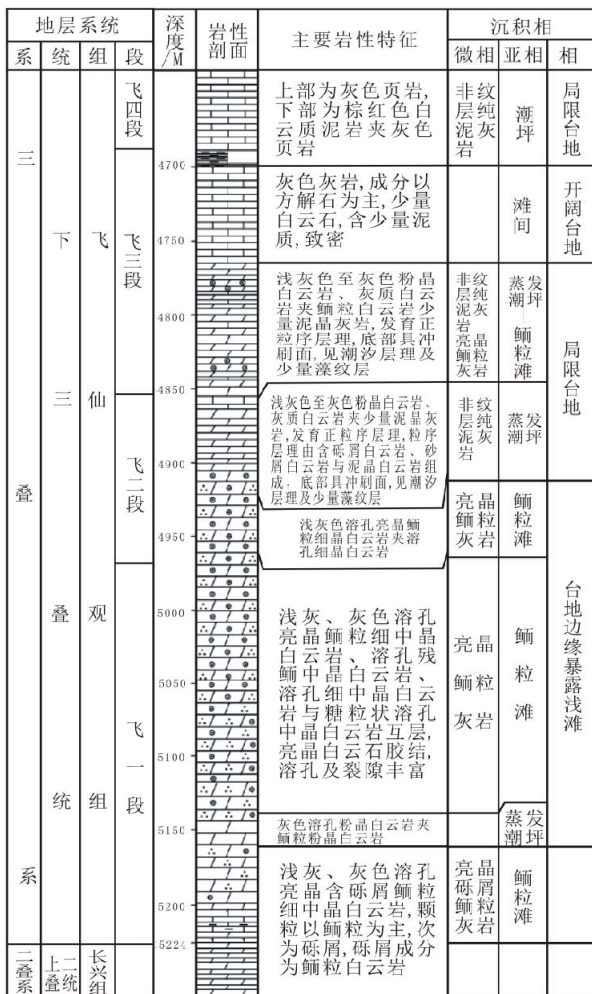


Figure 1. Column of lithology profile of feixianguan formation in the northeast Sichuan basin^[1]
图 1. 川东北地区飞仙关组岩性剖面柱状图^[1]

观点者认为其形成于埋藏环境。鲕滩间上覆或下伏沉积物主要以细粒沉积物为主,在成岩压实过程中,容易造成差异性压实。其形成的富 Mg^{2+} 地层水在差异压实作用的驱动下,优先沿灰岩裂缝或缝合面进入与其邻近的、具有较高孔、渗的鲕滩沉积物中,从而使其发生白云石化。这种差异性压实作用会一直延续到成岩晚期的深埋藏环境。

埋藏白云石化还常与裂缝及缝合线的发育密切相关^[10]。未固结或半固结的鲕粒滩受海平面变化的影响,周期性暴露地表,受到地表水的淋滤、溶蚀作用,在垂向上形成多层溶蚀孔缝,为埋藏期白云石化流体提供了有效的流通空间和通道。

3. 岩石学特征

3.1. 混合水白云岩的岩石学证据

3.1.1. 岩石结构特征

混合水成因解释的白云岩呈灰色或浅灰色中-厚层状,常与亮晶鲕粒灰岩、亮晶砂屑灰岩或亮晶生物屑灰岩互层。形成的白云石多为半自形-他形粉-细晶结构,晶体表面较浑浊。在镜下,这类白云岩中常保留鲕粒、砂屑等碎屑颗粒的残余结构^[4],有时白云石呈雾心亮边结构^[5]。

从白云石晶体形态、构造、大小及分布等方面分析,早成岩期白云石主要有以下特点:1) 保留有原岩颗粒的结构特征,如鲕粒的同心纹层结构(说明在大规模压实作用之前,鲕粒灰岩已发生白云石化);2) 粒间孔边缘或部分粒内孔中可见沥青充填(说明鲕粒云化发生在大规模有机烃运移之前);3) 可见二期方解石胶结物与白云石化颗粒共存(说明在第二期方解石胶结物形成之前或同时,鲕粒发生白云石化);4) 已发生白云石化的鲕粒被构造裂缝切割^[5];5) 鲕粒和胶结物全为白云石,部分表现为鲕粒为白云石而胶结物为方解石^[7];6) 岩石中的示底构造也是近地表环境大气水作用的证据之一,这类岩石分布于向上浅滩化旋回中滩体的顶部,这是大气淡水与海水混合水白云石化作用最容易发生地带^[11]。

3.1.2. 有序度和 $MgCO_3/CaCO_3$ 摩尔分数比值

发生混合水白云石化的前提条件是淡水与海水的混合,从而导致白云石化流体镁离子浓度降低,而 $n(Mg^{2+})/n(Ca^{2+})$ 值不变。此条件下的交代作用过程中,

结晶速度缓慢,钙、镁和碳酸根离子有充足的时间重新组合形成有序度更高的白云石,常形成具备较好晶形的自形-半自形白云石晶体^[12],晶体有序度相对较高(约 0.7 左右)^[13]。

通过参阅前人的研究资料,发现无论白云岩有序度高或低,均可用混合水白云石化作用来解释:有序度偏高的白云岩,说明其暴露时间较长,受大气淡水作用明显,混合水白云石化较彻底^[5]。通过与潮坪白云岩的有序度对比,鲕粒白云岩的有序度明显要偏高(图 2);其中有序度偏低的白云石可能由于暴露时间短,受淡水作用影响有限,白云石化作用过程快,交代不彻底^[14];而有序度中等的白云岩,结晶速度适中,其有序度介于埋藏白云岩和同生期白云岩之间。推测其形成环境也介于准同生和埋藏环境之间,为混合水环境^[7]。纵向剖面上有序度向下变低,显示了混合水白云石化过程中的流体下渗过程^[6]。

3.1.3. 阴极发光证据

混合水成因的白云石阴极发光颜色以蓝紫、紫红色为主,部分为桔红色。其中具有“雾心亮边”结构的白云石“雾心”呈紫色,“亮边”为橙黄-桔黄-桔红等交替的环带结构。此特点反应大气水对原岩(灰岩)白云石化过程由表及里的影响程度由强变弱,而呈现出递变的发光特征。阴极发光强度弱-中等,多呈暗褐色-暗桔红色^[14,15],也表明白云石形成的环境为受大气淡水影响的氧化环境^[6]。

3.2. 埋藏白云岩的岩石学证据

3.2.1. 岩石结构特征

埋藏白云岩晶粒粗、细不等,多为细-中晶,部分为粗晶,重结晶作用较强,常具“雾心亮边”结构。云

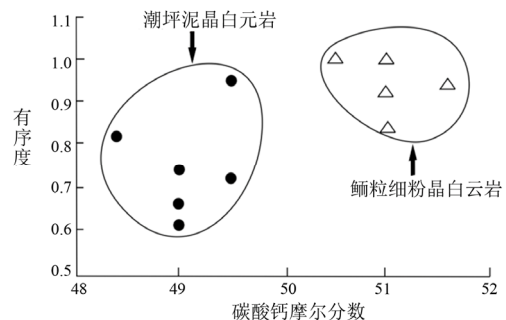


Figure 2. The distribution map of the order degree and the calcium carbonate mole fraction of dolomite^[5]
图2. 白云岩有序度、碳酸钙摩尔分数分布图^[5]

石晶体之间常存在交切现象, 鲕粒常被交代、原始结构消失殆尽, 局部偶见交代不彻底的残余方解石晶体。中晶白云石也常沿裂缝及缝合线分布, 说明成岩埋藏白云化过程具有明显的多期次性。

高梅生等(2007)根据埋藏交代成因白云岩的原始鲕粒结构保存状况和白云石结晶、洁净程度, 将其结构划分为四种类型, 然后根据岩石学特征将其解释为三个成岩阶段的埋藏白云化期次的产物^[3]。

埋藏白云石也常受控于成岩裂缝(缝合线)的分布, 显微镜下常见白云石化现象从靠近缝合线至远离缝合线有由强变弱特征。由此说明白云石化流体在缝合线流动过程中, 与周缘围岩发生交代形成白云石。因而此类白云石的形成晚于缝合线, 为埋藏成因^[10,15]。

3.2.2. 有序度和 $MgCO_3/CaCO_3$ 摩尔分数比值

埋藏成因的白云石有序度和 $MgCO_3/CaCO_3$ 摩尔分数比值主要受控于埋藏条件下盐度和温度的变化, 随着埋藏深度增加, 孔隙水盐度降低和温度的升高, 白云石化速度变慢, 有序度增加, $MgCO_3/CaCO_3$ 摩尔分数的比值逐渐达到化学计量级水平。

埋藏成因的白云石 X-衍射有序度值较高^[4], 并且在纵向上有规律变化, 显示了白云石化过程中的流体下渗过程。在不同成岩阶段的埋藏白云化过程中, 伴随孔隙水盐度降低^[4], 白云化速度逐渐变慢, 白云石有序度逐渐提高。

3.2.3. 阴极发光

埋藏白云石阴极发光具有暗淡红色的发光特征, 因为 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 进入到白云石晶格中, 表明白云石化处于还原环境, 这就意味着白云石化是在埋藏条件下发生的。因为在暴露或表层环境下, 铁锰离子呈氧化状态, 无法进入到白云石晶格中^[5]。

4. 地球化学特征

4.1. 混合水白云岩的地球化学证据

4.1.1. 碳氧同位素

氧同位素的组成受大气水稀释、蒸发作用和温度等因素的综合影响。温度降低和蒸发作用造成 $\delta^{18}O$ 值偏正; 温度增高和大气水稀释造成 $\delta^{18}O$ 值偏负; 甲烷生成造成 $\delta^{13}C$ 偏正, 有机物质氧化造成 $\delta^{13}C$ 偏负。

根据稳定碳氧同位素在碳酸盐岩成岩环境中的

应用^[16], $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 偏向较高负值表明为大气淡水成岩环境; $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 偏向较高正值表明为正常和咸化海水成岩环境; $\delta^{18}O$ 向高负值偏移而 $\delta^{13}C$ 相对稳定或向低负值偏移表明为较深埋藏成岩环境。鲕粒滩的 $\delta^{13}C$ 多介于 $-4\text{‰} \sim 4\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}O$ 主多介于 $-2\text{‰} \sim -7\text{‰}$ 之间, 且主要分布在混合水白云石化作用的区间(图 3), 这说明鲕粒滩白云岩主要由混合水白云石化作用形成^[7]。从沉积背景也可分析其混合水机理: 台缘鲕滩沉积时常暴露于海平面之上, 受到大气淡水影响, 因而 $\delta^{18}O$ 值偏负。

4.1.2. 锶含量

通过与本区上二叠统长兴组埋藏成因的白云石中 Sr 含量的对比, 飞仙关组白云岩 Sr 含量更低显示其混合水成因^[5]。

在碳酸盐沉积物在成岩过程中, Sr 的含量一般会降低。有研究显示^[7], 海水的 Sr 的含量大约为 $(1.00 \sim 1.20) \times 10^{-3}$, 受淡水影响形成的方解石 Sr 含量为

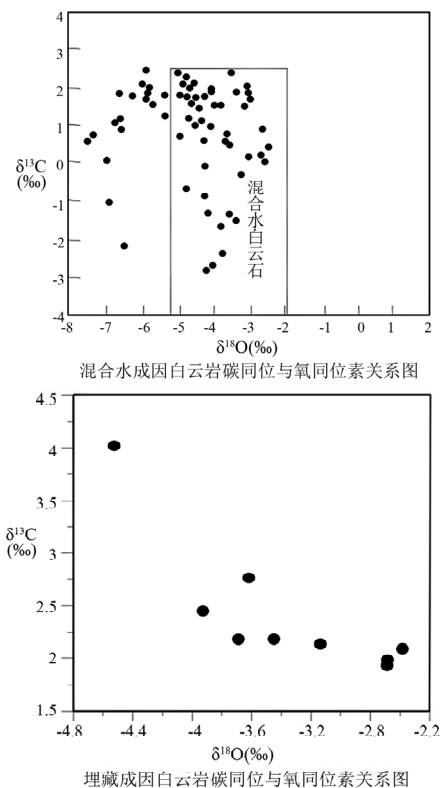


Figure 3. The comparison diagram of the carbon-oxygen isotopic characteristics of the mixed water domitization and buried dolomitization dolostone (according to Guoqi Wei, et al., Rongcai Zheng, et al.)

图 3. 混合水和埋藏白云石化白云岩碳氧同位素特征对比图(绘图数据引自魏国齐等(2005), 郑荣才等(2008))

1.50×10^{-4} 。研究区白云石中 Sr 含量主要分布于 2.50×10^{-4} 以下(表 1), 说明其形成过程中受到淡水的影响。

4.1.3. 微量元素

研究表明^[7], 受淡水的影响的白云岩具有更高的 Na 含量。现代白云石的钠含量较高, 达到 $(1.0\sim 3.0) \times 10^{-3}$, 而研究区鲕粒白云岩钠含量大多小于 6.00×10^{-4} (表 1), 反映其受大气淡水稀释作用的影响, 而非蒸发环境中形成的。

4.2. 埋藏白云岩的地球化学证据

4.2.1. 碳氧同位素

埋藏白云岩的氧同位素值比海水的氧同位素值要偏负(图 3), 其原因为温度效应。在埋藏条件下, 随着埋深的增加, 地层水温度升高。在“热的同位素分馏作用”下, 相对轻的 O^{16} 进入交代的白云石晶格中, 相对偏重的 $\delta^{18}O$ 进入到流体中, 这就是比海水 $\delta^{18}O$ 值偏负的白云岩具有埋藏白云石化特征的原因。

Table 1. The contrast table of the trace element compositions of the mixed water domitization and buried dolomitization dolostone (according to Wei Yang, et al., Rongcai Zheng, et al.)

表 1. 混合水和埋藏白云石化白云岩微量元素组成对比表(数据引自杨伟等(2011), 郑荣才等(2011))

混合水白云岩微量元素含量				埋藏白云岩微量元素含量				
类型	Sr ppm	Fe ²⁺ %	Fe ³⁺ %	Na%	类型	Sr%	Fe%	Mn%
鲕粒白云岩	434.6	0.086	0.071	0.053	早成岩埋藏白云岩	0.013	0.265	0.005
粗粉晶-细晶白云岩	201.1	0.093	0.13	0.043	中成岩埋藏白云岩	0.012	0.143	0.004
					晚成岩埋藏白云岩	0.02	0.285	0.0045

通过比较埋藏白云岩和二叠纪海水的碳稳定同位素值, 发现埋藏白云岩碳同位素值的变化范围在二叠纪海水碳同位素值变化范围内, 说明白云石化作用过程受有机碳影响较小, 也表明白云石化发生于浅-中埋藏环境, 此时处于生油窗前, 有机碳含量相对贫乏。

4.2.2. 锶含量及锶同位素

据黄思静等研究, 海相碳酸盐的成岩过程是一个 Sr 的丢失过程, 而飞仙关组碳酸盐岩的成岩过程中不但没有丢失锶, 反而获得了锶(表 1)。因而在埋藏条件或封闭环境中, 地层流体中富集锶, 形成富锶地层水, 发生再交代或沉淀于碳酸盐岩矿物中, 使围岩(碳酸盐岩)具有较高锶含量。

而根据对鲕粒滩白云岩和同期海水稳定同位素 Sr 的分析资料^[17](图 4), 可以看出研究区的大部分样品投影在海水的分布范围内, 个别样品投影在海水之上, 表明交代流体中的地层水不会是来自三叠系之上的地层水。晚二叠世的具残余海水性质的地层水和三叠纪的由残余海水组成的混合地层水是飞仙关组白云石化流体的主要组成及来源^[18,19], 同时白云石化流体是地层水也就暗示了其埋藏成因。

4.2.3. 埋藏白云岩的微量元素

飞仙关组不同成岩阶段白云岩微量元素 Fe、Mn、Sr 的分析结果(表 1), 表明飞仙关组各埋藏成岩阶段白云岩, Fe、Mn、Sr 含量非常相似, 与代表同期海水的泥-微晶灰岩比较, 都以具有较高的 Sr, 很高的 Fe 及很低的 Mn 含量为主要特征, 此特征表明成岩流

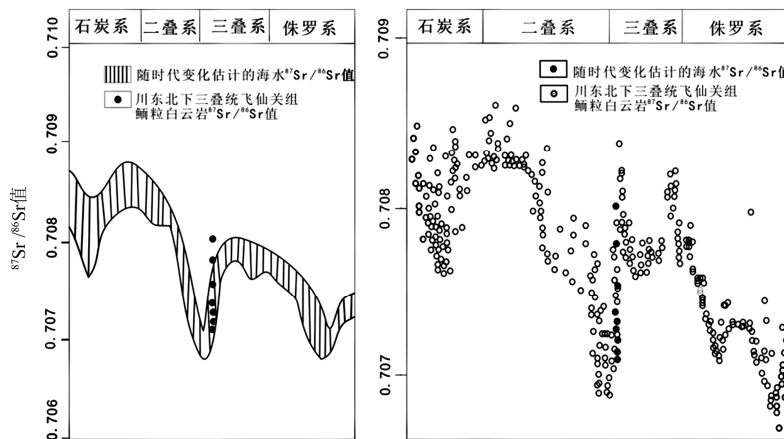


Figure 4. $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio of the oolitic beach dolostone in feixianguan formation in the northeast Sichuan basin^[25]

图 4. 川东北飞仙关组鲕粒滩白云岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值^[25]

体具有较强的还原性和缺乏大陆淡水的影响,为相对封闭的成岩环境产物标志^[20,21],成岩过程中文石的新生变形、脱 Sr 和多期次白云化与溶蚀作用,都发生在具有较强还原性、缺乏大陆淡水影响的封闭性成岩环境中^[12],由于在近地表或暴露的氧化条件下,高价铁、锰离子无法进入到白云石晶格,只有在埋藏还原环境下,低价的铁、锰离子才有可能进入到白云石晶格中^[18];同时相对应的各阶段埋藏白云岩的 Fe、Mn、Sr 微量元素含量和演化趋势也相同,也佐证了长兴组和飞仙关组各成岩阶段埋藏白云岩化流体的性质、来源和演化具有很强的相似性和继承性^[22]。

5. 结论

1) 通过形成环境的对比可以看出,持混合水成因观点者主要是从控制岩石分布的环境推测出其为混合水成因的可能性:形成于暴露在海平面以上的台地边缘滩,易受到海水和淡水混合的影响,具有发生混合水白云石化作用的客观条件,进而找到岩石结构、构造上的证据;但是持埋藏观点者认为飞仙关组广泛分布的准同生白云岩属于潮上蒸发环境产物,说明研究区在飞仙关期气候条件炎热干燥,缺乏潮湿气候下混合水带存在的可能性,不可能为混合水成因。且埋藏成因解释的白云岩,常沿裂缝及缝合线分布,在其分布地因地表淡水作用发育多层溶蚀孔隙,这恰好为白云石化流体(埋藏成因)提供了有利通道;

2) 对研究区白云岩同位素的争议,主要集中在对氧同位素偏负这一现象的解释。近地表条件下形成的混合水白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 含量比海水低;而持埋藏成因观点者根据“同位素分馏原理”和当时的气候条件(蒸发岩沉积表明干燥气候,缺乏大气水),认为飞仙关组滩粒白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值比海水偏负的原因是热的同位素分馏作用造成的,为埋藏成因;

3) 在微量元素方面,埋藏白云岩具有高含量的 Fe 微量元素和一定量的 Mn 微量元素显示出飞仙关组白云岩的成岩流体具有较强的还原性和缺乏大陆淡水的影响,为埋藏环境下的产物。而近几年来对锶同位素的研究更加确证了其埋藏成因^[17,19,23-26],并对研究流体来源提供了一定参考价值。相比之下,对于混合水白云岩,尽管有学者根据 Sr、Mn、Na 等微量元素进行解释^[7,14],但是其研究并不深入,不具有太大的说服力。

参考文献 (References)

- [1] 王恕一,蒋小琼,管宏林等.川东北普光气田鲕粒白云岩储层粒内溶孔的成因[J].沉积学报,2010,28(1):10-16.
- [2] 杨伟,胡明毅,钱勇.四川盆地北部飞仙关组白云岩化分析[J].大庆师范学院学报,2011,31(6):77-81.
- [3] 高梅生,郑荣才,文华国等.川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因——来自岩石结构的证据[J].成都理工大学学报(自然科学版),2007,34(3):297-304.
- [4] 穆曙光,周茂,华永川.川东北地区下三叠统飞仙关组白云岩成因类型[J].天然气工业,1994,14(3):23-27.
- [5] 王身建,郑超,雷卞军等.川东铁山地区飞仙关组鲕粒白云岩成因分析[J].河南石油,2004,18(6):13-14.
- [6] 陈更生,曾伟,杨雨等.川东北部飞仙关组白云石化成因探讨[J].天然气工业,2005,25(4):40-41.
- [7] 魏国齐,杨威,张林等.川东北飞仙关组滩层白云石化成因模式[J].天然气地球科学,2005,16(2):162-166.
- [8] 罗平,苏立萍,罗忠等.激光显微取样技术在川东北飞仙关组鲕粒白云岩碳氧同位素特征研究中的应用[J].地球化学,2006,35(3):325-330.
- [9] 杨威,魏国齐,金惠等.川东北飞仙关组滩层成岩作用和孔隙演化[J].中国地质,2007,34(5):822-828.
- [10] 陈辉,田景春,张翔等.川东北地区下三叠统飞仙关组滩层白云岩成因[J].天然气工业,2008,28(1):42-46.
- [11] 黄思静,卿海若,裴昌蓉等.川东三叠系飞仙关组白云岩锶含量、锶同位素组成与白云石化流体[J].岩石学报,2006,22(8):2123-2132.
- [12] 郑荣才,党录瑞,文华国等.川东北地区飞仙关组白云岩成岩作用与系统划分[J].地球科学——中国地质大学学报,2011,36(4):659-669.
- [13] 黄勇,魏志红,邓金花等.川东北飞仙关组白云岩成因及其次生孔隙[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(3):263-270.
- [14] 曾伟,黄先平,杨雨等.川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因及分布[J].西南石油大学学报,2007,29(1):19-22.
- [15] 张婷婷,刘波,秦善.川东北二叠系-三叠系白云岩成因研究[J].北京大学学报(自然科学版),2008,44(5):799-809.
- [16] 陈荣坤.稳定碳氧同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用[J].沉积学报,1994,12(4):11-20.
- [17] 强子同,曾德铭,王兴志等.川东北下三叠统飞仙关组滩层白云岩同位素地球化学特征[J].古地理学报,2012,14(1):13-20.
- [18] 王一,王兴志,王一刚等.川东北下三叠统飞仙关组白云岩的地球化学特征[J].沉积学报,2009,27(6):1043-1049.
- [19] 孟浩,汪益宁,滕蔓.四川盆地白云岩储层及白云岩化作用[J].科学技术与工程,2011,11(32):8015-8017.
- [20] 刘萍.川东北地区下三叠统飞仙关组白云岩成因分析[J].地质找矿论丛,2010,25(3):241-245.
- [21] 王恕一,蒋小琼,管宏林等.川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J].石油实验地质,2010,32(4):365-372.
- [22] 郑荣才,史建南,罗爱君等.川东北地区白云岩储层地球化学特征对比研究[J].天然气工业,2008,28(11):16-21.
- [23] 郑荣才,耿威,郑超等.川东北地区飞仙关组优质白云岩储层的成因[J].石油学报,2008,29(6):815-821.
- [24] 黄思静,卿海若,胡作维等.四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩成岩作用和白云岩成因的研究现状和存在问题[J].地球科学进展,2007,22(5):495-503.
- [25] 郑荣才,文华国,郑超等.川东北普光气田下三叠统飞仙关组白云岩成因——来自岩石结构与 Sr 同位素和 Sr 含量的证据[J].岩石学报,2009,25(10):2459-2468.
- [26] 黄思静,咚宏鹏,刘丽红等.川东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云化机制[J].岩石学报,2009,25(10):2363-2372.