

# 白云岩成因研究现状及进展

李振宏<sup>1)</sup> 杨永恒<sup>2)</sup>

1) 长庆油田公司勘探开发研究院; 2) 长安大学资源学院

**摘要:**白云岩成因的研究目前还处于假说阶段,主要包括蒸发、渗透回流、海水、混合水以及埋藏白云岩化作用五种模式。其分类方法主要依赖于地球化学特征的研究,包括阴极发光、电子探针、碳氧同位素、稀土元素以及 X 射线衍射分析。伴随着计算机及模拟试验水平的提高,未来白云岩成因的研究将会结合实际地质条件,设计合理的参数和模型,用计算机模拟的手段加以展现。

**关键词:**白云岩;阴极发光;电子探针;碳氧同位素;稀土元素;X 射线衍射

**中图分类号:**TE122.2\*21

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2005)02-0005-03

## 1 白云岩成因研究现状

白云岩是碳酸盐岩油气勘探的一个重要的目的层,从世界范围来看,目前已经知道白云岩中有丰富的油气。由于白云岩是一个成岩相,所以白云岩的产状变化多端,块状、似层状、层状都可以出现。即使是层状,它的储集性能也表现出很强的非均质性。基于以上原因,白云岩的油气勘探具有一定特殊性,油气并非都一定聚集在构造的高部位。鉴于这种情况,从地质学上研究白云岩的成因、产状和分布都是非常必要的。

白云岩的形成机理是碳酸盐岩石学中最复杂、争论时间最久而又难以解决的问题之一。Friedman 等在研究现代热带地区潮上带表层碳酸钙沉积物的粒间准同生白云化作用时,首先提出了“毛细管浓缩作用”<sup>[1]</sup>。在其后 30 多年的研究中,随着对现代和古代沉积物中白云化作用研究的深入,加之先进的测试仪器的应用,测试精度的提高,众多的学者不仅在显微镜下观察,更重要的是通过 X 射线衍射、酸不溶物分析、碳氧同位素分析、微量元素、电子探针、阴极发光、扫描电镜、包裹体测温等多种测试数据,从整块白云岩到单个白云石晶体,从岩石学特征到地球化学特征,从定性到定量,对白云岩的形成机理进行了系统的研究。因为各个时代白云岩的生成条件不同,而生成之后,在漫长的地质历史演化过程中经历的成岩改造更是千差万别,因此世界各地迄

今仍没有一个圆满的解决其成因的学说和观点。目前,中国对白云岩的研究也取得了一定的进展。如对酒西盆地青西坳陷白云岩化作用<sup>[2]</sup>、四川震旦系的白云岩化作用<sup>[3,4]</sup>、塔里木盆地寒武系到奥陶系的白云岩化作用<sup>[5]</sup>、任丘油田雾迷山组白云岩化作用<sup>[6]</sup>、鄂尔多斯盆地奥陶系的白云岩化作用<sup>[7,8]</sup>、东营凹陷西部沙三段上白云岩化作用<sup>[9,10]</sup>、济阳坳陷始新统藻白云岩化作用<sup>[11]</sup>、中扬子台地北缘灯影组的白云岩化作用等的特征及形成机理都进行了研究<sup>[12]</sup>,提出了适合该区特色的白云岩成因模式。

有关白云岩的生成机理目前总体上依然处于假说阶段,已提出的白云化作用假设模式归纳起来主要有蒸发、渗透回流、海水、混合水以及埋藏白云化作用五种模式,前四种基本上发育于近地表成岩环境,最后一种则出现于埋藏成岩环境。

## 2 白云岩成因主要研究方法

在不同的成岩环境中,引起白云化作用和白云石生成的流体显然具有不同的成分与特性。一般地,它们可以是正常海水,经过蒸发浓缩或修饰的海水、大气水与海水形成的混合水、地层水、甚至来自深部的热液等。由它们交代形成的白云岩,必然或多或少地留下其地球化学烙印,尤其是稳定同位素和某些微量元素,这是利用白云岩的地球化学特征解释其成因的基础。除交代流体外,原岩的成分、环境条件、后期的再改造作用等也都有一定影响,导致

收稿日期 2004-10-06; 改回日期 2005-01-15。

作者简介:李振宏,男,工程师,2002 年毕业于石油大学(北京)构造地质专业并获硕士学位,现从事天然气地质方面的研究工作。联系电话:(029)86592443,通讯地址:(710021)陕西省西安市长庆油田公司勘探开发研究院天然气勘探室。

了用于解释白云岩成因的地球化学标志具有某种程度的不确定性和多解性,还有待于再进一步深入研究。通常是综合运用白云岩的地球化学、矿物学、岩石学等特征来解释与推测其成因。

## 2.1 阴极发光分析

矿物的阴极发光是其成分、结构、构造等特点的直观反映。利用阴极发光可以用来鉴定矿物及其内部化学成分的变化,还可以恢复其原岩结构,了解孔隙形成与演化的规律,查明胶结物世代和化学成分的变化,进而确定矿物形成时介质的物化条件<sup>[13]</sup>。白云石的阴极发光和白云石的形成机理有很大的关系,混合水白云化作用形成的白云石发光强度大,可以达到亮桔黄色,而且白云石内部环带构造发育;埋藏白云化作用形成的白云岩发光最弱,为灰暗的暗褐色到不发光;准同生白云岩和回流渗透白云岩发光性介于两者之间,为暗红—暗褐色,并且多数白云石中心发光较亮,边缘发光较暗,发光性与雾心亮边结构一致。控制矿物发光的主要因素是  $Mn^{2+}$  和  $Fe^{2+}$  的含量以及它们之间的比例,而  $Mn^{2+}$  和  $Fe^{2+}$  的含量变化与矿物形成的环境有关,因此同种矿物的发光强度和颜色也可能差异很大<sup>[14,15]</sup>。白云石由于形成机理和环境的多样性,其晶体结构和地球化学特征亦各有特点,在阴极发光下就有不尽相同的表现。白云岩的发光性是指白云岩的平均发光性。由于白云石晶体的形成和生长是一个地质演化过程,在这一过程中,环境介质条件可能发生很大的变化,白云石不同部位的发光也就有很大的差异。如混合水白云岩由于白云化环境的相对易变性,白云石晶格中的  $Mn^{2+}$  和  $Fe^{2+}$  的含量及其比值不断的变化,因而在阴极发光下就会呈现明暗相间的复杂发光环带。关于准同生白云岩和回流渗透白云岩,在阴极发光下的主要区别是准同生白云岩晶体细,发光较均匀,而回流渗透白云岩因其晶体较大,岩石又常见后期的溶解充填的白云石及埋藏白云石加大胶结的改造,因而见斑块状发光和晶体亮心暗边发光。

## 2.2 电子探针分析

电子探针分析主要用于分析白云石的微量元素含量,常用的元素有钾、钠、铁、锰、锶、钡、钒、镍、钴等。作为碳酸盐岩的环境指示标志之一,微量元素钾、钠、锶与铁、锰在不同的白云岩类型中含量不同。海水中的钾、钠、锶含量越高,反映形成白云石时的溶液盐度越高;铁、锰的含量反映白云石形成时的埋藏深度,埋藏越深,成岩强度越强,铁、锰的含量越

高。准同生白云化作用发生在沉积物未固结之前,孔隙水与海水相通,处于潮上蒸发云坪环境,水的盐度和温度较高,因此形成的白云岩具有富钾、钠、锶、铁特征。混合水成因的白云化发生在正常海水与淡水潜流带混合区,盐度降低,水体淡化,形成的白云岩中的钾、钠、锶含量低于准同生白云岩中的含量,由于形成于近地表成岩环境,故铁、锰含量低。埋藏白云岩的白云化作用发生于浅埋—深埋成岩环境,孔隙间以压释水为主,与海水和淡水相比,钾、钠、锶贫乏,铁、锰富集,因此形成的白云岩具有贫钾、钠、锶和富铁、锰的特征。

## 2.3 碳氧同位素分析

根据同位素分馏的原理,海水蒸发作用使海水的碳、氧同位素向偏正方向发展,所以准同生白云岩中的碳、氧同位素值比海水和海水胶结物的碳、氧同位素更偏正。相反,埋藏条件下地下卤水是海水、地层水,包括有淡水和海水混入的地下流体,再加上高温使氧同位素一般要向偏负的方向发展,所以埋藏白云石的氧同位素比海水和海水胶结物偏负,比准同生白云岩更要偏负。埋藏条件下,碳同位素由于淡水混入和有机碳的进入变化比较大,但总的来说还是比海水胶结物和准同生白云岩要偏负。

碳酸盐岩中的稳定碳氧同位素组成可以用来定量的恢复沉积环境的古盐度和古水温,确定成岩环境,查明沉积物形成后的大气淡水参与成岩作用的强度以及研究白云岩的形成机理。白云石的碳氧同位素组成取决于引起白云化的介质的碳氧同位素组成,并主要受到介质盐度和温度的影响。咸化介质中形成的白云石具有较高的  $\delta^{18}O$  和  $\delta^{13}C$  值,混合水成因的白云石则具有较低的  $\delta^{18}O$  和  $\delta^{13}C$  值(图1)<sup>[16]</sup>。大气淡水环境下的成岩作用使岩石的  $\delta^{18}O$  和  $\delta^{13}C$  值均下降。当大气淡水迅速的流过孔隙时,  $\delta^{18}O$  值可能变化不大,而当大气淡水缓慢流动,甚

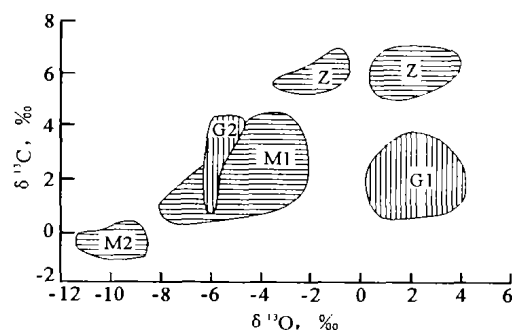


图1 古代白云石的碳氧稳定同位素组成  
(据 Hird, 1987)<sup>[17]</sup>

Z—渗透回流成因; G1—混合水成因; G2—埋藏成因的含铁白云石;  
M1—埋藏成因(含泥岩脱水作用); M2—埋藏成因白云石胶结物

至渗流于岩石中时,岩石中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值就会发生较大变化。大气淡水的渗入对 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响不及对 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响明显,这是因为淡水中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值往往被溶解于水中的碳酸盐所缓冲。 $\delta^{13}\text{C}$ 值取决于沉积成岩环境的介质,海水和深埋藏环境中沉积的 $\delta^{13}\text{C}$ 多为正值,而 $\delta^{18}\text{O}$ 则随埋深增大,温度升高而负值增大。

$\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值都与盐度有关,其变化趋势都是盐度越高, $\delta$ 值越高。基思等把 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值二者结合起来用于指示古盐度<sup>[16]</sup>,即

$$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50) \quad (1)$$

式中: $Z$ 为古盐度; $\delta^{13}\text{C}$ 为碳同位素的值; $\delta^{18}\text{O}$ 为氧同位素的值。

$Z$ 值大于120时为海相石灰岩; $Z$ 值小于120时为淡水石灰岩; $Z$ 值等于120时为未定型石灰岩。利用公式(1)测定中、新生代岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ ,并计算其盐度指数 $Z$ ,通常是有效的。由于古碳酸盐岩形成后,因碳同位素难以交换而使 $\delta^{13}\text{C}$ 较稳定,故仍可以 $Z$ 值表示其古盐度。根据白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 计算出的古盐度 $Z$ 值还可以区分出白云岩的成因类型及其叠加成岩作用的强度。白云岩中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 和盐度指数 $Z$ ,因白云岩成因不同而不同。准同生白云岩具有高 $Z$ 值,均大于120;在浅水沉积中,因大气淡水渗流作用而形成的白云岩具有低 $Z$ 值,均小于120。利用氧同位素值还可以计算白云岩形成的环境温度,从而确定白云岩的成因,因为埋藏成因的白云石比表生成因的白云石具有更高的温度。

## 2.4 稀土元素分析

稀土元素(REE)是指原子序数为57~71的一组元素,分别为镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镱(Dy)、铕(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)。稀土元素组内各元素的晶体化学性质相似,由此决定了它们具有相似的地球化学性质,故在地质作用和成岩过程中,它们常作为一个整体运移。但由于它们仍存在着微小的差异,再加上反映地质环境的物理化学条件不同,故它们运移的方式和聚集的丰度亦有所不同。它们的习性、浓度和相对丰度可以为岩石成因提供信息。在这15个元素中一般把前7种元素划为轻稀土(LREE),后8种元素划为重稀土(HREE)。在这些元素中,能够反映成因环境的主要是 $\delta\text{Eu}$ 异常和 $\delta\text{Ce}$ 异常。

铕的富集与亏损主要取决于含钙造岩矿物的聚

集和迁移;铈反映了表生作用的氧化条件,在氧化条件下亏损,在缺氧条件下富集。准同生白云岩主要形成于潮上蒸发云坪环境,处于氧化环境条件下,铈亏损比较严重,而铕富集比较强烈,这可能是因为潮上蒸发作用使水体中盐度变大, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比增高。混合水白云岩化形成于海水潜流带与淡水潜流带之间的过渡区, $\delta\text{Ce}$ 接近于1,亏损与富集不明显,介于氧化—还原环境之间,而 $\delta\text{Eu}$ 小于1,负异常,铈亏损,这可能是因为淡水的注入,使水体中盐度变小, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比降低, $\text{Ca}^{2+}$ 富集, $\text{Mg}^{2+}$ 减小,造成铕的亏损。埋藏白云岩化作用,由于处于相对封闭环境,因而铈相对比较富集(图2)。

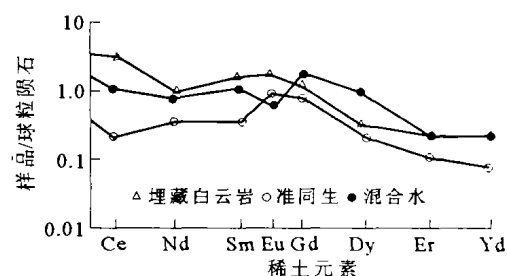


图2 白云岩成因 REE 模式

## 2.5 X 射线衍射分析

海水对白云石来说是饱和或过饱和的,但是在近地表条件(温度小于 $50^{\circ}\text{C}$ ),是不能从海水中沉淀白云石的,主要原因是白云石沉淀时,除了饱和度外,还需要克服动力学障碍,所以准同生白云石化交代灰泥沉积物形成的白云石是富Ca的白云石,这种白云石的有序度很低,处于欠稳定状态,它们在成岩作用过程中,要发生重结晶作用和离子交换,接近于化学计量的白云石,结晶程度变好,有序度增加。

埋藏白云石是在高的温度(大于 $50^{\circ}\text{C}$ )和压力比较大的条件下交代灰岩,高的温度可以克服白云石化的动力学障碍,有利于白云石化作用,也有利于有序度高的化学计量的白云石形成。这种白云石比准同生白云化形成的白云石具有更高的有序度和稳定性。

X 射线衍射分析在白云岩中主要用于确定白云岩中 $\text{CaCO}_3$ 的摩尔含量和白云石的有序度<sup>[18-20]</sup>。大多数天然产出的白云石,包括很大一部分古代白云石,其 $\text{CaCO}_3$ 的摩尔含量变化为50%~56%,有序度变化为0.2~1.0。白云石的 $\text{CaCO}_3$ 的摩尔含量及有序度与其形成条件有着明显的关系。有序度低,反映了快速结晶的沉积环境,如准同生白云岩化;有序度高,反映了成核作用较慢的大气地下水与海水混合的成岩环境,如混合水白云岩化。埋藏白

云石是在高的温度和压力条件下交代灰岩,高的温度可以克服白云石化的动力学障碍,有利于白云石化作用,有利于有序度高的化学计量的白云石形成。这种白云石比准同生白云化形成的白云石具有更高的有序度和稳定性。

### 3 白云岩成因研究发展趋势

通过构造背景、沉积环境的分析,结合地球化学资料,从而对一个地区的白云岩成因进行综合分析,这是目前白云岩成因研究所采用的主要方法,也是比较有效的手段。白云化作用是以水文学的背景来考虑的,按照水文学背景,白云化作用又可以划分为埋藏压实作用、渗透回流作用、流体的热对流作用以及海平面上升和下降驱动流体的作用。Kaufman 就试图在水文学和沉积学之间架起一座桥梁,以便于比较好地了解碳酸盐岩台地典型的古水文系统的特征<sup>[21]</sup>。盆地中的水化学特征可以用计算机来模拟,如果结合实际地质条件,设计合理的参数和模型,白云化作用也可以用计算机来加以模拟。高速计算机的使用,使复杂的水文学问题的数值模拟变的更为容易和方便,这也是未来研究白云岩成因的又一有效的手段,并且被越来越多的地质家所采用。

#### 参考文献:

- 1 Friedman G M, Sanders J E. Principle of sedimentology. In: Chilingar G V, Bissell H J, Fairbridge R W eds. Carbonate rocks: Origin, occurrence and classification. Amsterdam: Elsevier, 1967: 100 ~ 120
- 2 罗平,杨式升,马龙等. 酒西盆地青西坳陷湖相纹层状泥质白云岩中泥级斜长石成因、特征与油气勘探意义. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 31 ~ 33
- 3 陈明启. 川西南下二叠统白云岩成因探讨. 沉积学报, 1989, 7(2): 45 ~ 50
- 4 王运生,金以钟. 四川盆地二叠统白云岩及古岩溶的形成与峨

- 眉地裂运动的关系. 成都理工学院学报, 1997, 24(1): 8 ~ 16
- 5 顾家裕. 塔里木盆地奥陶统白云岩特征及成因. 新疆石油地质, 2000, 21(2): 120 ~ 122
- 6 韩宝平. 任丘油田雾迷山组白云岩储集层的渗透性试验研究. 地质科学, 2000, 35(4): 396 ~ 403
- 7 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. 沉积学报, 2000, 18(3): 424 ~ 430
- 8 张传禄,张永生,康祺发等. 鄂尔多斯南部奥陶系马家沟群马六组白云岩成因. 石油学报, 2001, 22(3): 22 ~ 26
- 9 田景春,曾允孚,尹观等. 东营凹陷西部沙河街组三段上部泥岩中白云岩夹层成因研究. 矿物岩石, 1977, 17(4): 61 ~ 67
- 10 冯有良,杨申铨,范存堂. 东营凹陷西部沙三上白云岩储层特征及成藏条件. 特种油气藏, 1995, 2(4): 9 ~ 15
- 11 张玉滨. 济阳坳陷始新统藻白云岩成岩演化探讨. 石油实验地质, 1994, 16(1): 53 ~ 59
- 12 翟永红,郭成贤,郭建华等. 中扬子台地北缘灯影组白云岩研究. 矿物岩石, 1996, 16(3): 36 ~ 42
- 13 王英华,张绍平,潘荣胜. 阴极发光技术在地质学中的应用. 北京:地质出版社, 1990
- 14 Walker G, Aquillar O E. Luminescence spectroscopy of  $Mn^{2+}$  in rock-forming carbonates. Mineralogical Magazine, 1990, 53(70): 357 ~ 369
- 15 黄思静. 碳酸盐岩矿物的阴极发光性与其 Fe/Mn 含量的关系. 矿物岩石, 1992, 12(4): 34 ~ 45
- 16 詹姆斯 N P, 肖凯 P W 著. 古岩溶. 张绍海译. 北京:石油工业出版社, 1992
- 17 Hird. The composition of carbonate and oxygen isotope in the ancient dolomite. AAPG Bulletin, 1987, 34(4): 156 ~ 232
- 18 Plesch R. XRF analysis of major constituents in silicate rocks. X-Ray Spectrom. 1976, 12(5): 5 ~ 20
- 19 李国会,樊守忠,张忠. 熔融法 X 射线荧光光谱测定硅酸盐样品中的硫等 20 个元素. 光谱学与光谱分析, 1994, 14(1): 105 ~ 120
- 20 刘集银. 青海小柴旦白云石的 X 射线衍射特征. 矿物岩石, 1986, 6(2): 60 ~ 80
- 21 Kaufman R L, Ahmed A S. Gas chromatography as a development and production tool for fringe printing vidual reservoirs: application in the Gulf of Mexico Gulf coast. AAPG Bulletin, 1990, 48(3): 263 ~ 282

编辑 程 慧

欢迎投稿 欢迎订阅