

白云石的阴极发光特征相似,以紫红色和蓝紫色为主,部分为桔红色,斑状白云石多为紫红色和蓝紫色,其周围的方解石呈暗红色和橙黄色,说明白云石化作用不完全。白云石的雾心亮边是以紫色为核心、亮边由橙黄—桔黄—桔红等交替组成环带,界线平直,反映成岩孔隙流体随成岩环境及淡水混合程度的变化而变化,说明白云石化过程中淡水是不断地混入的。同时,紫红—蓝紫色的阴极发光也说明白云石成因与淡水有关^[2]。

2.1.3 有序度

白云石晶体有序度与形成条件有密切关系,它反映白云石晶体形成的溶液条件和结晶速度。一般 Mg/Ca 值低的溶液中结晶速度缓慢, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 有充足的时间形成有序的白云石晶格。研究区的两类白云石的有序度不同,斑状灰质白云岩有序度较高为 0.85~0.90,层状白云岩有序度 0.57~0.68,说明前者较后者白云石的结晶速度慢,晶形好。

2.2 地球化学特征

2.2.1 元素成分变化

白云石中的 CaCO_3 摩尔百分比含量与形成条件有密切关系。高盐度环境下 Mg/Ca 值 5~10,正常海水的 Mg/Ca 值为 1 左右。据 3 口井白云岩中 CaCO_3 摩尔百分比计算,尽管白云岩晶体大小或结构上有所不同,但白云石中 CaCO_3 摩尔百分比含量是接近的,为 50%~53%,接近理想的白云石,说明白云岩是在溶液 Mg/Ca 值低(0.9~1),较潮湿、无蒸发作用的低盐度环境中形成的^[3]。

2.2.2 Sr、Na 的含量

研究区白云岩的 Sr 的含量很低(表 1),斑状灰质白云岩平均含量为 132.4×10^{-6} ,层状白云岩平均含量为 93×10^{-6} 。已知海水的 Sr 的含量大约为 $1\ 000 \times 10^{-6} \sim 1\ 200 \times 10^{-6}$,与蒸发岩有关超盐水白云石 Sr $> 550 \times 10^{-6}$,埋藏白云岩为 $66 \times 10^{-6} \sim 170 \times 10^{-6}$,混合带白云石为 $70 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ ^[4],因此研究区的白云石形成时有淡水的加入,产于埋藏环境或混合带环境。

近代生物成因的碳酸盐岩 Na 含量为 $5\ 000 \times 10^{-6} \sim 8\ 000 \times 10^{-6}$,佛罗里达、巴哈马群岛、阿拉伯湾及巴芬湾的现代白云石 Na 含量为 $1\ 000 \times 10^{-6} \sim 3\ 000 \times 10^{-6}$ ^[3],而研究区白云岩 Na 的含量相对很低,斑状灰质白云岩 Na 的平均含量 263×10^{-6} ,层状白云岩的平均含量为 578.6×10^{-6} (表 1),说明下奥陶统白云岩的成岩环境不是蒸发环境,而是在成岩过程

中受到大气淡水稀释作用的结果。层状白云岩的 Na 含量比斑状灰质白云岩高一倍多,说明斑状灰质白云岩所受到淡水的影响更大。

2.2.3 碳氧同位素特征

现代大洋中 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-1\ ‰ \sim +2\ ‰$,Popp 和 Lo-haun 根据变化最少的无脊椎动物和海水胶结物,求出地质历史中海水的碳氧同位素,下奥陶统海水胶结物中 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-1\ ‰$ 和 $-0.5\ ‰$ 之间,可见研究区下奥陶统两类白云岩碳同位素值都明显偏负(表 1),与同层位灰岩相比也偏负(灰岩平均值为 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-0.5\ ‰$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-3.82\ ‰$);威斯康星中奥陶统混合白云石化作用形成的白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-4.47\ ‰$ ^[5],与研究区层状白云岩差不多(其为 $-4.42\ ‰$),而斑状灰质白云岩则要低一些。表明它们都与大气淡水有同位素交换,斑状灰质白云岩与大气淡水同位素交换更多。

根据公式 $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$ 计算出的盐度指数 Z 值可以区分白云岩的成因类型^[2]。研究区斑状灰质白云岩 Z 值平均为 119.2,层状白云岩平均为 120.8,研究区下奥陶统灰岩的 Z 值平均为 125.8,因此斑状灰质白云岩可能形成于淡水环境,两类白云岩 Z 值位于 120 左右,说明白云岩形成时有淡水的加入,斑状灰质白云岩受海水的影响更小。

2.3 成岩温度和深度

许多学者研究认为 $\delta^{18}\text{O}$ 值与其形成温度有关,并提出了许多 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间的关系式,如公式(1):

$$T = 14.8 - 5.41 \times \delta^{18}\text{O} \text{ 和公式(2):}$$

$$\alpha T - 2 = (1\ 000 \text{ Ln} \alpha + 32.9) / 3.09 \times 10^{-6}$$

(其中 $1\ 000 \text{ Ln} \alpha = \delta^{18}\text{O}$ 样品 - $\delta^{18}\text{O}$ 海水, $\delta^{18}\text{O}$ 海水取 $+4\ ‰$ SMOW)^[2]。运用公式(1)计算出斑状灰质白云岩平均成岩温度为 $47.9\ ^\circ\text{C}$ 、层状白云岩平均成岩温度为 $39.8\ ^\circ\text{C}$,运用公式(2)计算出斑状灰质白云岩平均成岩温度为 $91.4\ ^\circ\text{C}$ 、层状白云岩平均成岩温度为 $78.6\ ^\circ\text{C}$ 。将两种温度取算术平均值所得结果较近实际^[2],这样研究区斑状灰质白云岩成岩温度为 $69.6\ ^\circ\text{C}$ 、层状白云岩成岩温度为 $59.2\ ^\circ\text{C}$ 。研究区地温梯度约为 $2.5\ ^\circ\text{C}/100\ \text{m}$ (地面温度取 $20\ ^\circ\text{C}$),则推测斑状灰质白云岩成岩深度为 $2\ 000\ \text{m}$ 左右、层状白云岩为 $1\ 500\ \text{m}$ 左右,因此主要的白云石化时期应在晚奥陶世或志留纪。

3 白云石化模式

通过对研究区下奥陶统白云岩的矿物学、地球化学和成岩温度深度等特征的研究,笔者认为该区白云

表 1 玛 2、3、4 井白云岩地球化学指标

Table 2 Geochemical indexes of dolomite in Ma 2 3 4 well

岩性	井号	深度/m	碳氧同位素 / ‰, PDB		盐度指 数 Z 值	成岩温度/℃			微量元素 × 10 ⁻⁶	
			δ ¹³ C	δ ¹⁸ O		公式 (1)	公式 (2)	平均	Na	Sr
层状白云岩	玛 2 井	2316.2	-1.66	-4.18	121.8	37.4	74.6	56.0	331	135
		2320.9	-2.02	-6.19	120.1	48.2	92.0	70.1	681	101
		2322.5	-1.92	-4.51	121.1	39.2	99.5	58.3	1480	122
		2377.3	-2.34	-5.62	119.7	45.2	87.1	66.2	319	138
		2455.5	-1.96	-6.46	120.0	49.7	94.3	72.0	331	92.1
		2461.1	-3.06	-5.45	118.3	44.3	85.7	65.0	752	100
	玛 3 井	1683.6	-2.22	-5.42	120.5	44.1	85.3	64.7	68	85.2
		1685.7	-2.02	-4.95	120.7	41.0	80.4	60.7	710	90.1
	玛 4 井	2553.2	-2.28	-3.03	121.1	31.2	64.7	47.9	554	49.6
		2554.3	-2.23	-1.64	121.9	39.3	77.6	58.4	668	47.1
		2610.7	-1.87	-4.52	121.3	39.3	77.6	58.4	840	85.2
		2795.1	-1.88	-2.75	122.1	29.7	62.2	46.0	788	41
		2785.4	-1.97	-2.75	121.9	29.7	62.2	46.0	117	123
	平均值		-2.11	-4.42	120.8	39.8	78.6	59.2	587.6	93.0
	斑状灰质白云岩	玛 2 井	2126.1	-2.08	-5.89	120.1	46.7	89.5	68.1	171
2126.2			-2.0	-6.52	119.9	50.7	95.9	73.3	198	144
2126.7			-3.48	-5.65	117.4	45.7	87.9	66.8	191	127
玛 3 井		1517.8	-2.71	-6.31	118.6	48.9	93.1	71.0	62.5	108
玛 4 井		2370.9	-2.6	-5.45	119.3	44.3	85.7	65.0	869	170
		2373.2	-2.34	-5.75	119.6	45.9	88.2	67.1	217	153
		2375.4	-2.27	-7.0	119.2	53.7	99.1	75.9	135	130
平均值			-2.49	-6.08	119.2	47.9	91.4	69.6	263.4	132.4

岩有两种成因模式,即层状白云岩为早期浅埋藏海水—淡水混合白云石化模式,斑状灰质白云岩为晚期深埋藏压实流—淡水混合白云石化模式。

3.1 早期浅埋藏海水—淡水混合白云石化模式

该区层状白云岩形成于局限台地沉积环境,水体闭塞,盐度较高,其沉积物粒间孔隙水为超盐度的高 Mg/Ca 比值的流体,其碳氧同位素、微量元素也较正常海水高,随着上覆沉积物的堆积不断被埋藏,埋藏到一定的深度,其东北部的塔北古陆向区内提供大量的淡水,并沿着斜坡向研究区近地表沉积物渗流,这种低盐度、低 Mg/Ca 比的大气淡水在玛扎塔格构造带与高盐度、高 Mg/Ca 比的孔隙流体混合(图 2),使得这种孔隙水被稀释,盐度迅速下降,碳氧同位素、微量元素变低,但 Mg/Ca 比值变化不大,导致混合水白云石化作用发生。淡水不断的加入,白云石逐渐形成,所以阴极发光具有环带。这种白云石化作用时间不长,随着深度的增加,沉积物完全脱离这种淡水—海水混合环

境,而趋于停滞,致使白云石形成时间并不充分,有序度较低。早奥陶世晚期,海平面升高,局限台地向开阔台地发展,沉积物和沉积水体又趋于正常,由于这种白云石化作用缺乏物质基础,因此层状白云岩仅位于下奥陶统下部。

3.2 晚期深埋藏压实流—淡水混合白云石化模式

斑状灰质白云岩与层状白云岩在矿物学、地球化学、成岩温度和深度方面都有较大的差别,用塔里木盆地地下古生界白云石化模式^[6]都不能很好的解释其成因,结合其白云岩特征和该区岩相古地理,将其总结为晚期深埋藏压实流—淡水混合白云石化模式。

奥陶纪末期,玛扎塔格构造带属于开阔台地相,沉积水体盐度正常,下奥陶统之上的沉积物以泥灰岩、泥纹灰岩为主,泥质含量较重,随着沉积物的加厚,泥灰岩达到 2 000 m 以上时,粘土矿物中的蒙脱石向伊利石转变,伴随有大量的 Sr、Fe、Ca、Mg 等离子释放进入孔隙水,与孔隙水一起被挤压流动,由于重力的作用,

大部孔隙水会向下流动。另一方面,塔北古陆之上的大气淡水通过古陆边缘的沙井子断裂在重力作用下向地下深部渗透,地表富含 CO_2 的大气淡水和来自深部富含 Mg^{2+} 离子的孔隙水在下奥陶统上部粒间孔较发育的颗粒灰岩中相遇,使 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 达到过饱和,发生白云石化作用(图 3)。

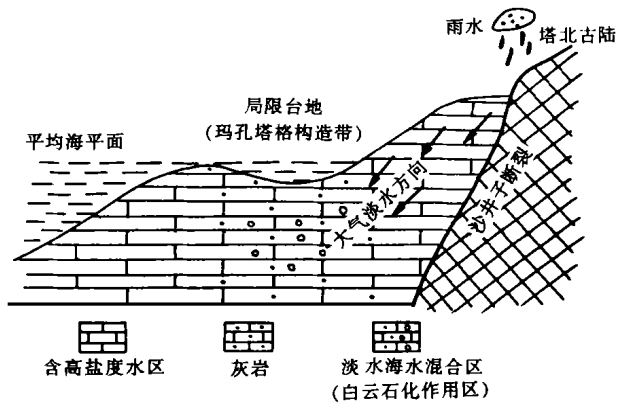


图 2 早期浅埋藏海水—淡水混合白云石化模式
Fig. 2 Model of dolomitization early shallow-buried fresh-sea water mixed environment

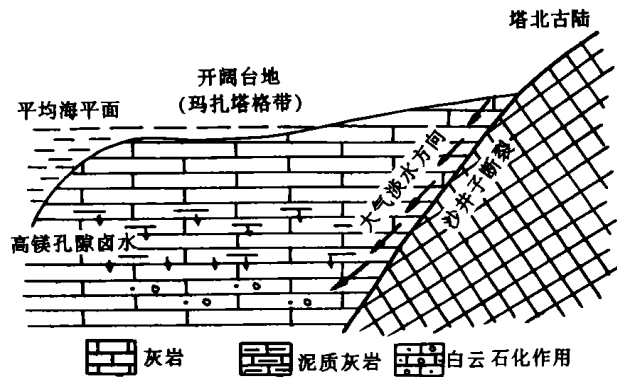


图 3 晚期深埋藏压实流—淡水混合白云石化模式
Fig. 3 Model of dolomitization late deep-buried compaction flow and fresh water mixing environment

泥质灰岩产生的富 Mg^{2+} 离子的孔隙流体是有限的,向下渗流的深度也有限,因此斑状灰质白云岩仅限

于下奥陶统上部 30~100 m; 颗粒灰岩的粒间孔分布不均,孔隙度大的地方有两种流体混合,能产生白云石,致密部分缺乏形成白云石的物质,因此白云岩呈斑状;富 Mg^{2+} 离子的孔隙流体向下渗透慢、作用时间较长,有充足的时间结晶,因此白云石晶形大、有序度高;粘土矿物中有 Sr 产生,故形成的白云石 Sr 含量比层状白云石高,孔隙水盐度小、Na 含量低,因此形成的白云石 Na 含量比层状白云石低;少量粘土矿物如伊利石、伊蒙混层等沉积于白云石晶间;受海水作用更小,所以碳氧同位素值更偏负, Z 值小于 120。

4 结论

- (1) 塔里木盆地和田河气田下奥陶统发育两类白云岩,下部以层状白云岩为主,上部以斑状灰质白云岩为主,其矿物学、地球化学特征差别明显。
- (2) 层状白云岩以细晶为主, Sr、Na 含量低,碳氧同位素明显偏负,白云石有序度偏低,阴极发光具环带,成岩温度不高特征说明其为早期海水—淡水混合带白云石化作用的产物,并总结了其白云石化模式。
- (3) 斑状灰质白云岩同层状白云岩相比,晶形较粗、以中晶为主, Sr 含量偏高、Na 含量偏低,有序度高,碳氧同位素更偏负,成岩温度较高,说明其形成于晚期深埋藏压实流—淡水混合环境,并总结了其白云石化模式。

参 考 文 献

- 1 贾承造,姚慧君,魏国齐等. 塔里木盆地板块构造演化和主要构造单元地质构造特征[A]. 见:童晓光,梁狄刚主编. 塔里木盆地油气勘探论文集[C]. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1992. 207~225
- 2 郭建华,覃汉生. 塔北轮南地区下奥陶统白云石化[A]. 见:童晓光,梁狄刚主编. 塔里木盆地油气勘探论文集[C]. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1992. 411~423
- 3 陈志远,马振芳,张锦泉. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五₅亚段白云岩成因[J]. 石油勘探与开发. 1998, 25(6): 20~23
- 4 刘宝君,张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京:科学出版社,1994. 237~255
- 5 K. 巴迪奥扎曼尼. 混合白云化作用模式——应用于威斯康星的中奥陶统[J]. 天然气勘探与开发, 1979, (2): 10~21
- 6 沈昭国,陈永武,郭建华. 塔里木盆地地下古生界白云石成因机理及模式探讨[J]. 新疆石油地质, 1995, 16(4): 319~323

Dolomite Origin of Lower Ordovician in Hetian River Gas Field, Tarim Basin

YANG Wei WANG Qin-hua LIU Xiao-zhen

1(Petroleum Geology, Gas Department Research Institute of Petroleum
Exploration and Development Langfang Branch, Langfang Hebei 065007)

2(Tarim Petroleum Exploration and Development Headquarters Karla Xinjiang 841000)

Abstract

The Hetian river gas field is a new and large gas field in Mazatage fault belt of Tarim basin. Ordovician carbonate rock is principal production formation. Lower Ordovician is characterized by developed dolomitization which can greatly improve reservoir property. There are two types of dolomite in Lower Ordovician. The bedded dolomite is in lower part. Their features is fine-crystal, cathodoluminescence of violet-red and blue-violet, degree of order 0.57~0.68, low Sr and Na content, and negative carbon oxygen isotope value, implying that the bedded dolomite was formed in environment of early shallow-buried fresh water and seawater mixing. On the contrary the upper part patch calcareous dolomite is medium-crystal, degree of order 0.85~0.90, high-Sr content, low-Na content, and more negative value carbon oxygen isotope indicating that the patch dolomites was formed in environment of late deep-buried compaction flow and fresh water mixing.

The bedded dolomite was formed in an environment of restricted platform, where water was confined and salinity was high. There was porous water of high salinity with high Mg/Ca in intergranular pore of original sediment. It has much higher carbon oxygen isotope value and trace element contents than normal seawater. During burial, there was a lot of fresh water down from east-northern Tabei old-land along slope to this area. Fresh water and porous seawater with high salinity will be mixed in sediment, resulting in the dilution of pore water salinity, value of carbon oxygen isotope and trace element will decrease. But the Mg/Ca ratio will keep unchanged. So dolomitization will take place.

Late Ordovician in Mazatage fault belt is open platform facies. Salinity of seawater is normal. Over lower Ordovician sediment is mainly mud limestone and mud intercalation limestone. When mud limestone was buried over 2 000 m, montmorillonite in clay mineral transferred to illite. A lot of ion of Sr, Fe, Ca, Mg and so on came into pore fluid. Because of gravity, pore-fluid will flow downwards from Tabei old-land along the Sajingzi fault. Two types of flow mixed in grain limestone of upper lower Ordovician. $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ was over saturation. Patch calcareous dolomite will be formed. Two types of dolomitization can be formed in mixed water, but the Mg ion sources are different. The later is a special genetic model.

Key words Tarim Basin Lower Ordovician dolomite dolomite origin