

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

加拿大阿尔伯达省西部上泥盆统 凯恩组白云岩的成因

金振奎

R.J.Spencer

(石油大学, 北京)

(卡尔加里大学, 加拿大)



加拿大阿尔伯达省西部上泥盆统凯恩组主要由粉晶白云岩和细晶白云岩组成, 另外还常见一种充填溶蚀孔洞的亮晶白云石。粉晶白云岩纹理、泥裂和鸟眼等构造发育, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $+1.0\%$ — $+3.0\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -6.0% — -4.3% , 为潮坪上混合水白云化形成。细晶白云岩分布于假整合面之下, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $+0.2\%$ — $+2.9\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -6.9% — -4.5% , 也是混合水白云化的产物。亮晶白云石洁净明亮、晶粒粗、含液体包裹体, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $+0.5\%$ — $+2.7\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -10.8% — -7.7% , 液体包裹体的冰点为 -22.6 — -18.3°C , 形成温度为 107 — 170°C , 亮晶白云石是从热咸水中沉淀形成的。

关键词 加拿大 上泥盆统 凯恩组 白云岩成因 混合水白云化

1 引言

加拿大阿尔伯达省西部肯毛尔 (Canmore) 地区在卡尔加里市西约 110 km 处, 位于落基山脉东缘。该区上泥盆统凯恩组白云岩沿一系列北西向断块分布, 露头良好, 但已全部白云化。由于在本区东部阿尔伯达盆地内与凯恩组层位相当的白云岩中发现了大量油气, 因此凯恩组白云岩成因的研究将具有重要的实际意义。

肯毛尔地区上泥盆统之下为中泥盆统和寒武系, 之上为石炭系。中泥盆统厚度很小, 零星分布于寒武系顶面的侵蚀洼沟内。上泥盆统与石炭系和中泥盆统之间为假整合接触。

上泥盆统自下而上分为 4 个组 (表 1), 即凯恩组 (Cairn Fm.)、撒赛斯克组 (southesk Fm.)、撒瑟那组 (Sassenach Fm.) 和帕里瑟尔组 (Palliser Fm.)。前 2 个组由白云岩组成, 撒瑟那组由白云岩、砂岩和粉砂岩组成, 帕里瑟尔组由石灰岩组成。撒赛斯克组与撒瑟那组之间为假整合, 其余各组之间均为整合接触。

工作区内, 凯恩组厚达 200m, 并分上、下两段。下段厚约 30m, 由一系列厚 1—3m 的上浅旋回 (由潮下到潮上) 组成。上段厚约 170m, 主要由潮下沉积的层孔虫细晶白云岩组成。本文将描述凯恩组中各类白云岩的特征, 并探讨其成因。

2 白云岩类型及特征

凯恩组白云岩可分为 2 类, 即粉晶白云岩和细晶白云岩。此外, 还有一种充填溶蚀孔洞的亮晶白云石。

表 1 阿尔伯达省西部泥盆系的划分
Table 1 Division of the Devonian in western Alberta

系	统	组	岩 性
石炭系	下 统	埃克斯哨组	黑色页岩
泥 盆 系	上 统	帕里瑟尔组	深灰色块状石灰岩, 含少量云斑, 厚度>100m
		撒瑟那组	砂岩、粉砂岩和白云岩, 厚度>10m
		撒赛斯克组	浅灰、灰色, 厚层-块状细中晶白云岩, 层孔虫及珊瑚等化石常见, 厚度约 200 m
		凯 恩 组	深灰、浅灰色, 厚层到块状细晶白云岩和粉晶白云岩, 厚度约 200m
	中 统	牙哈提达组	浅灰色薄层粉晶、细晶白云岩
寒武系	上 统	林克浙组	浅灰色薄层粉晶、细晶白云岩

粉晶白云岩由粉晶白云石组成, 浅灰色, 风化后呈土褐色。中层状, 水平纹理、泥裂和鸟眼构造均很发育, 并与叠层石共生 (图 1), 表明其原始沉积于潮坪环境。粉晶白云岩主要分布于凯恩组下段, 与潮下沉积的深灰色含层孔虫等化石的细晶白云岩组成上浅旋回。旋回底部深灰色细晶白云岩常含土褐色粉晶白云岩的内碎屑, 这说明粉晶白云岩是在上覆沉积物沉积之前形成, 为潮坪上形成的准同生白云岩。其 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为+1.0‰—+3.0‰、-6.0‰—-4.3‰ (均为PDB标准, 图 2, 表 2)。

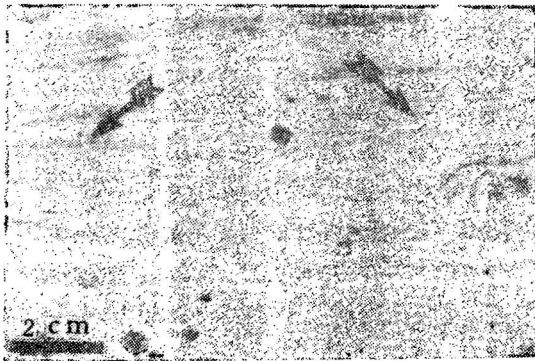


图 1 具水平纹理和泥裂 (箭头) 发育的粉晶白云岩

Fig. 1 Microcrystalline dolostones with well-developed horizontal laminations and mud-cracks (arrow)

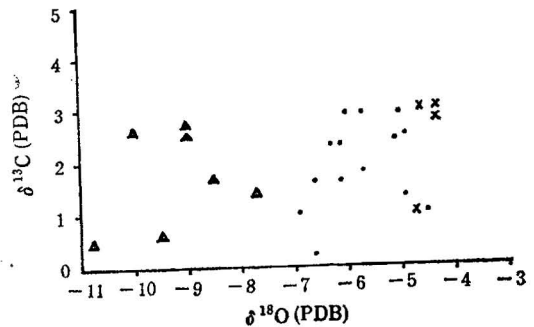


图 2 阿尔伯达省西部凯恩组中白云岩及亮晶白云石的碳、氧同位素分布

Fig. 2 Distribution of carbon and oxygen isotopes of dolostones and sparry dolomite of the Cairn Formation, western Alberta

▲—亮晶白云石; x—粉晶白云岩; ●—细晶白云岩
▲—Sparry dolomite; x—microcrystalline dolostones;
●—finely crystalline dolostones

细晶白云岩由他形细晶白云石组成, 呈深灰色, 厚层到块状 (图 3)。其内水平虫孔 *Planolites*、椭圆状层孔虫及珊瑚等均常见, 层孔虫长为 3—10 cm, 含量 10%—65%, 其原岩显然为潮下沉积。

表 2 阿尔伯达省西部凯恩组白云岩及亮晶白云石的碳、氧同位素(PDB)
Table 2 Carbon and oxygen isotopes (PDB) of dolostones and
sparry dolomite of the Cairn Formation, western Alberta

粉晶白云岩	$\delta^{13}\text{C}$	+3.0	+3.0	+2.8	+1.0			
	$\delta^{18}\text{O}$	-4.3	-4.6	-4.3	-4.7			
细晶白云岩	$\delta^{13}\text{C}$	+2.9	+2.9	+2.9	+2.5	+2.4	+2.3	+2.3
	$\delta^{18}\text{O}$	-5.0	-5.7	-3.0	-4.9	-5.1	-6.1	-6.3
	$\delta^{13}\text{C}$	+1.8	+1.8	+1.6	+1.6	+1.3	+1.0	+1.0
	$\delta^{18}\text{O}$	-5.7	-5.7	-6.1	-6.6	-4.9	-4.5	-6.9
	$\delta^{13}\text{C}$	+0.2						
	$\delta^{18}\text{O}$	-6.6						
亮晶白云石	$\delta^{13}\text{C}$	+2.7	+2.6	+2.5	+1.7	+1.4	+0.6	+0.5
	$\delta^{18}\text{O}$	-9.0	-10.0	-9.0	-8.5	-7.7	-9.5	-10.8

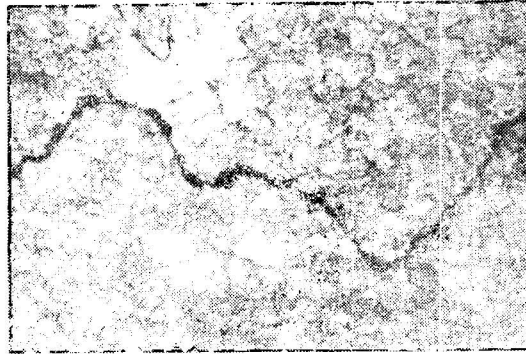


图 3 白云石呈他形并被缝合线切割的细晶白云岩
(-, $\times 30$)

Fig. 3 Finely crystalline dolostones composed of anhedral dolomite and cut by stylolite

表 3 阿尔伯达省西部凯恩组亮晶白云石中液体包裹体的形成
温度(Th)和冰点(Tf)

Table 3 Homogenization temperatures (Th) and freezing temperatures
(Tf) of fluid inclusions of sparry dolomite in the Cairn
Formation of western Alberta

Th (°C)	170.8	162.9	160.0	160.5	165.2	164.7	164.4	164.0	168.0
Tf (°C)								-22.6	-21.2
Th (°C)	163.6	161.4	160.8	153.8	151.5	153.5	153.9	150.8	154.8
Tf (°C)							-20.3		-18.3
Th (°C)	152.9	155.4	157.8	154.7	158.6	156.4	157.6	152.5	146.3
Tf (°C)									
Th (°C)	141.3	147.0	134.4	133.4	121.4	124.5	127.6	121.4	129.8
Tf (°C)									
Th (°C)	125.5	115.4	117.7	119.9	116.6	118.6	107.7		
Tf (°C)				-19.7					

积。细晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 $+0.2\%$ — $+2.9\%$ 、 -6.9% — -4.5% (图 2, 表 2)。

另外, 在工作区凯恩组中还见有一种较特殊的亮晶白云石, 其充填层孔虫选择性溶蚀形成的孔洞及裂隙中 (图 4)。晶粒为几毫米至几厘米, 洁净透明, 自孔洞边缘向中心逐渐变大, 并常具生长环带。亮晶白云石内液体包裹体普遍存在 (图 5), 大小多为几十微米。经测定, 包裹体的形成温度为 $107\text{—}170^\circ\text{C}$, 平均 146°C (表 3); 包裹体内水的冰点为 $-22.6\text{—}-18.3^\circ\text{C}$ (表 3), 亮晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 $+0.5\%$ — $+2.7\%$ 和 -10.8% — -7.7% (图 2, 表 2)。

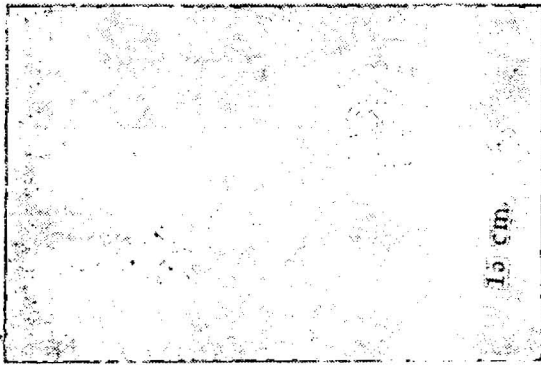


图 4 充填层孔虫选择性溶蚀形成的孔洞中的亮晶白云石

Fig. 4 Sparry dolomite in vugs formed by selective dissolution of filled stromatoporoids

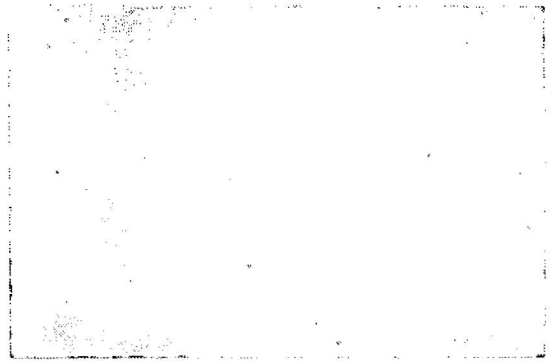


图 5 亮晶白云石中的液体包裹体 (—, $\times 200$)

Fig. 5 Liquid inclusions in sparry dolomite

3 白云岩成因

3.1 粉晶白云岩的成因

粉晶白云岩晶粒细, 颜色浅, 纹理、泥裂和鸟眼构造发育, 并在准同生期形成, 因此是潮坪准同生白云岩。由于无蒸发矿物或其假晶, 推测当时气候潮湿, 类似于巴哈马台地上现代准同生白云岩的形成环境。

粉晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -6.0% — -4.3% , 平均值为 -4.5% , $\delta^{18}\text{O}$ 值较低, 反映了其白云化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 为负值 (SMOW 标准)。如果粉晶白云岩的形成温度为 $15\text{—}25^\circ\text{C}$ (据现代准同生白云岩的形成环境, 这种假定是合理的), 那么据图 6 可确定白云化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 -6% — -8% (SMOW) 范围内。正常海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 0% 左右, 浓缩海水其值更高, 因此白云化水不是正常或浓缩的海水, 而可能是海水与淡水的混合水。混合水不仅能提供大量的 Mg^{+2} , 而且可以对方解石不饱和而对白云石饱和, 从而导致白云化^[1]。

潮坪上的沉积物既受海水, 又受淡水的影响。大气水降落到潮坪上时, 可与沉积物孔隙中的海水混合, 从而导致白云化, 形成准同生白云岩。本区粉晶白云岩很可能就是这种成因, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化, 是由于海水与淡水以不同比例混合所致。

3.2 细晶白云岩的成因

细晶白云岩晶粒粗, 交代化石, 为准同生后白云岩。

细晶白云岩分布于撒赛斯克组与撒瑟那组之间的假整合面下, 凯恩组、撒赛斯克组已全部白云化, 但假整合面之上, 除十几米厚的撒瑟那组中含纹理发育的准同生粉晶白云岩外, 帕里瑟尔组厚层块状石灰岩仅发生轻微白云化 (含少量云斑)^[3]。因此, 凯恩组细晶白云岩的形成很可能与假整合面有关。陆地边缘地区, 可形成大规模的海水与淡水的混合带。在海退过程中, 混合带

可侧向移动，从而导致大规模白云化。细晶白云岩的碳、氧同位素分析结果与这一解释相符。

从图 2 可以看出，细晶白云岩与粉晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近，因此形成它们的白云化水是相似的，即都是海水与淡水的混合水。细晶白云岩中常见由化石等溶蚀形成的孔洞(图 4)，其内充填亮晶白云石。这类孔洞可能是在白云化过程中，白云化水对方解石不饱和，而使方解石溶蚀所形成。

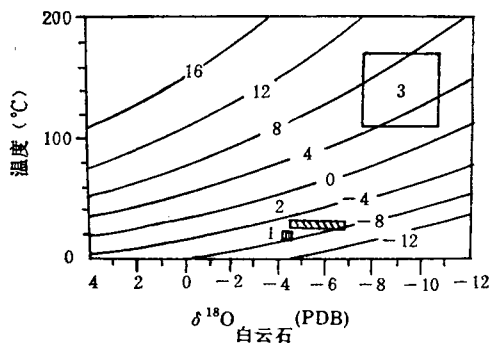


图 6 白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)、其形成温度(°C)及白云化水的 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, 图中曲线)之间关系图
(据 Land, 1983^[2])

Fig. 6 Diagram of $\delta^{18}\text{O}_{\text{dolomite}}$ (PDB)-temperature (°C)- $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ (SMOW, curved lines in the fig.)
(according to Land, 1983^[2])

1—粉晶白云岩; 2—细晶白云岩; 3—亮晶白云石
1—Microcrystalline dolostones; 2—finely crystalline dolostones; 3—sparry dolomite

由于撒赛斯克组和凯恩组分别厚约 200m，如果凯恩组细晶白云岩的形成与假整合面有关，那么凯恩组细晶白云岩形成深度大致在 200—400m 之间。如果地表年平均温度为 20°C，地温梯度为 3°C/100m，那么细晶白云岩的形成温度在 26—32°C 之间。据细晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和图 6，可推测白云化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 -4.5‰—-8.5‰ 之间，可见不是海水，而是海水与淡水的混合水。形成细晶白云岩所需的大量 Mg^{+2} 由海水提供。

3.3 亮晶白云石的成因

工作区内凯恩组亮晶白云石充填溶蚀孔洞和细晶白云岩的裂缝，从而说明它是直接从水中沉淀形成的。

亮晶白云石中包裹体的测试结果表明，亮晶白云石是从温度为 107—170°C 水中沉淀的。水的冰点 -22.6—-18.3°C，可见为咸化水。据亮晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和其形成温度，可以确定沉淀亮晶白云石的水的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 +1.5‰—+10‰ 之间(图 6)，说明不是淡水。亮晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 均为正值(表 2)，也说明了这点。

形成亮晶白云石的水与工作区以东阿尔伯达盆地中泥盆系地层水相似，地层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -4‰—+8‰ (SMOW)^[4]，可见沉淀亮晶白云石之咸化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值包括在这一范围内。Aulstead and Spencer^[5]认为，该泥盆系地层水来自残留于泥盆系蒸发岩中的咸化海水。

综上所述，形成亮晶白云石的水与形成粉晶及细晶白云岩的水截然不同，前者是温度较高的咸化水，而后者是海水与淡水的混合水。

本文是作者在加拿大学习期间硕士论文的一部分。在撰写论文过程中，卡尔加里大学地质系 A. E. Oldershaw 教授、J. C. Hopkins 副教授曾就白云岩成因提出过重要建议；在测定白云岩碳、氧同位素的过程中，卡尔加里大学同位素实验室的实验人员给予了大力支持，在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Badiozamani K. The dorag dolomitization model—application to the Middle Ordovician of Wisconsin; Jour. Sed. Petrology, 1973, 43: 965—984.
- 2 Land L S. The application of stable isotopes to studies of the origin of dolomite and to problems of diagenesis of clastic sediments; Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, Short Course Note Series, 1983, (10): 4.1—4.22.

- 3 Mountjoy E W, Geldsetzer H H J. Devonian Stratigraphy and sedimentation, southern Rocky Mountains; in R. I. Thompson and D. G. Cook (eds.), *Field guides to geology and mineral deposits*, Calgary, 81 Annual Meeting, 1981, 195—224.
- 4 Hitchon B, Friedman I. Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin—I. stable isotopes of hydrogen and oxygen; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, (33): 1321—1349.
- 5 Aulstead K L, Spencer R J. Diagenesis of the Keg River Formation, northwestern Alberta; fluid inclusion evidence; *Bull. Canadian Petroleum Geology*, 1985, (33): 167—183.

ORIGIN OF DOLOSTONES OF THE UPPER DEVONIAN CAIRN FORMATION, WESTERN ALBERTA, CANADA

Jin Zhenkui

(*University of Petroleum, Beijing*)

R. J. Spencer

(*University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada*)

Abstract

The Upper Devonian Cairn Formation in western Alberta, Canada, is completely dolomitized. The dolostones can be divided into two types: microcrystalline dolostones and finely crystalline dolostones. In addition, there is also a kind of vug-filling sparry dolomite.

Microcrystalline dolostones are light gray, with a yellowish brown weathering surface, and show horizontal lamination, mudcracks and bird's-eyes. Their $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ are $+1.0\text{‰}$ — $+3.0\text{‰}$ and -6.0‰ — -4.3‰ (PDB), respectively. They result from dorag dolomitization on tidal flats.

Finely crystalline dolostones result from dolomitization of subtidal limestones, and are distributed below the parallel unconformity. Their $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ are $+0.2\text{‰}$ — $+2.9\text{‰}$ and -6.9‰ — -4.5‰ , respectively, similar to those of microcrystalline dolostones. They are also formed by dorag dolomitization.

Sparry dolomites are very coarse, and contain many fluid inclusions. The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of sparry dolomites are $+0.5\text{‰}$ — $+2.7\text{‰}$ and -10.8‰ — -7.7‰ , respectively. The freezing temperatures of fluid inclusions are from -22.6°C to -18.3°C , and the homogenization temperatures are from 107°C to 170°C . Sparry dolomites are precipitated from hot saline water.

Key words: Canada, Upper Devonian, Cairn Formation, dolostones origin, dorag dolomitization

作 者 简 介

金振奎, 生于1963年4月, 1983年毕业于华东石油学院勘探系地质专业。现为石油大学(北京)博士研究生。通讯处: 北京902信箱。邮政编码: 100083。