

米粒状白云石及其出溶成因

邬金华

(中国地质大学地质系 武汉)

Philip Fralick

(Geology Department, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Canada P7B 5E1)

提要 米粒状白云石产于奥陶系近岸碳酸盐岩序列的云斑(生屑)泥晶灰岩、砾屑灰岩和叠层石灰岩中,在虫孔和砾屑粒间最为富集,外形为伸长菱面体,薄片呈米粒状。晶体无环带或雾心,但内部含大量呈规则分布的细小方解石“包体”,结晶 C 轴垂直于晶体延长方向。与背景方解石泥晶相比,Fe、Mn、Na 和 Ba 含量较高, Sr 含量较低。C 轴的固定取向排除了石膏假晶的可能,也不是普通白云石化或交代钡白云石的结果,推测是沉淀镁方解石重结晶后在压力增加的条件下经出溶作用形成。

关键词 镁方解石 重结晶 出溶作用 米粒状白云石

第一作者简介 邬金华 男 46 岁 讲师 岩石学

对现代和古代白云石广泛深入的研究使我们意识到,至少大多数白云石都属交代成因,而非白云石的碳酸盐矿物向白云石转变的环境和物化条件却变化极大,很难用单一的物化模式或地质模式囊括所有类型白云石的形成过程。几年前,笔者在野外工作中发现了一种米粒状白云石,就目前所知,这是一种少见的白云石。笔者对其形态、成分、结构等等作了研究,对其成因进行了探讨。

一、实验室研究

除仔细观察普通岩石薄片(包括旋转台)、茜素红 S 染色薄片和手标本外还采用了扫描电镜、能散分析、阴极发光分析、化学分析和 X 衍射分析等。

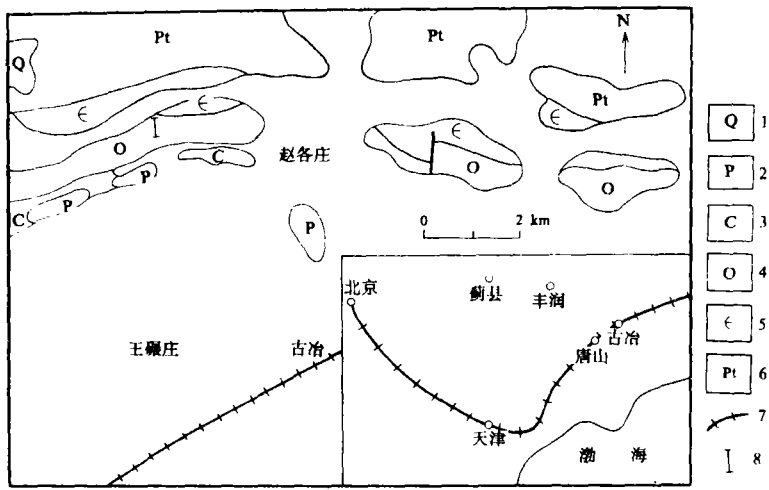
扫描电镜样事先用 2% 的稀盐酸处理 10 分钟。定性和定量能散分析采用 Tracor Northern 5502 系统,工作条件为 $V = 20\text{kV}$, $TA = 18^\circ$, 束电流为 $0.379\text{--}0.382\text{nA}$ 。定量分析时, Mg 和 Ca 的发射线分别取自镁橄榄石和磷灰石并用标准白云石作了检验,分析结果作了 ZAF 校正。定性分析采用 128×128 点阵,单点计数时间为 0.1 秒。

化学分析样进行了如下矿物分离:含米粒状白云石的云斑泥晶灰岩粉末用过量稀盐酸(2%) 在室温下处理大约 6 小时直到反应完全停止。经过洗涤过滤的不溶物(包括白云石和其它杂质)再用热盐酸处理得到杂质样。分别对上述溶解矿物(方解石)、不溶物和杂质用标准原子吸收技术作了成分分析。

白云石的精确成分由 X 衍射由线计算获得。衍射内标为化学纯 NaCl。

二、地层概况

米粒状白云石产于河北唐山赵各庄以西约3公里处的下奥陶统亮甲山组(图1)。按白云石化强度,该组可大致分成上下两段(图2)。上段主要为细晶白云岩,夹几层角砾状细晶白云岩和少量云质条带泥晶灰岩。在细晶白云岩中偶而可见内碎屑和化石碎片阴影状残余。下段岩性较复杂,上部为细晶白云岩和云斑(生屑)泥晶灰岩、叠层石灰岩、砾屑灰岩互层。在云斑(生屑)泥晶灰岩内部有大量虫孔,虫孔和粒间白云石化构成了两种形态特殊的云斑(图版1,1)。下部主要为互层的云斑、云条泥晶灰岩和云斑亮晶颗粒(生屑、内碎屑、藻屑等)灰岩。底部为3—12m厚的叠层石灰岩。综观岩性和层序,此外亮甲山组沉积于潮下到潮间地带,但对组内白云岩(即三山子白云岩)的成因却有诸多解释,无法取得一致认识



1.第四系松散沉积 2.二叠系砂岩 3.石炭系砂岩 4.奥陶系碳酸盐岩
5.寒武系碳酸盐岩 6.元古界变质岩 7.铁路 8.剖面位置

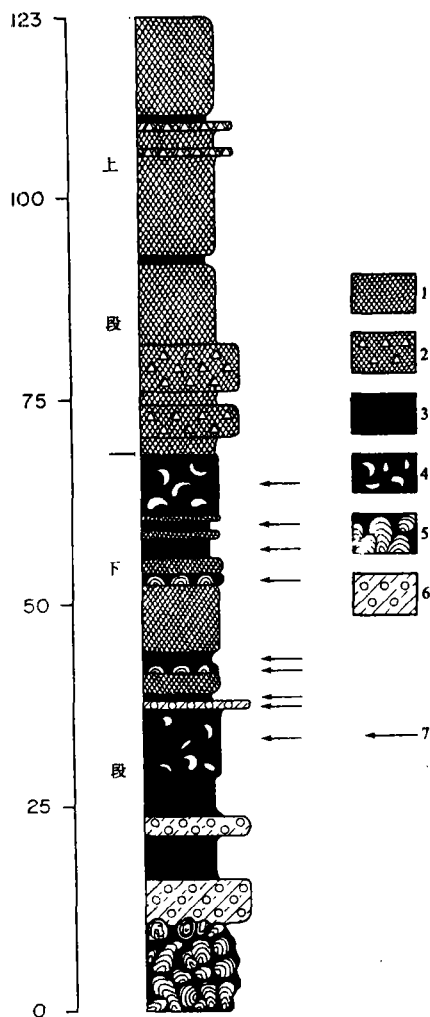
图1 区域地质略图及剖面位置

Fig. 1 Sketch map of regional geology and the location of measured section

米粒状白云石赋存在该组下段上部的云斑(生屑)泥晶灰岩、砾屑灰岩和叠层石灰岩中(图2)。宏观上,亮甲山组白云石化从上往下逐渐减弱,但是米粒状白云石既不与上段细晶白云石(自形菱面体或它形、具环带或雾心)共生,也不与下段下部含铁白云石和发育在藻粒内部或周边的具弧形边缘的白云石共生,这说明该处亮甲山组白云岩恐不会为单一成因。

三、特征描述

如果生长不受限制(散布在方解石泥晶的背景中),米粒状白云石看来仍为菱面体,但在一个方向上明显地伸长了(图版1,5),致使薄片多呈拉长的六边形、平行四边形或梯



1. 细晶白云岩 2. 角砾状细晶白云岩 3. 云条或云斑泥晶灰岩 4. 云斑叠层石灰岩 5. 云斑亮点颗粒 (生屑、砾屑、藻屑) 灰岩 6. 米粒状白云石出现层位

图 2 亮甲山组地层层序和米粒状白云岩产出层位

Fig. 2 Stratigraphic sequence of Liangjiashan Group and horizons of the rice-shaped dolomite

形 (图版 I, 3) . 晶体一般长 0.1—0.15mm, 宽 0.03—0.04mm, 长轴指向杂乱. 在虫孔内部和砾屑颗粒之间, 晶体非常密集且较大较胖, 长约 0.2—0.5mm, 宽约 0.1—0.3mm, 自形程度变差, 但一向伸长的特征仍很明显 (图版 I, 2、4) . 在虫孔四周, 随距虫孔距离的增加, 晶体大小和密集程度有减小的趋势, 但在砾屑内部, 晶体却小而稀疏 (图版 I, 2、4) . 偶而晶体可交切腕足或三叶虫碎片 (图版 I, 6) . 晶体与普通白云石的光性相同, 但绝无环带或雾心. 单个晶体的消光明晰而均匀. 旋转台上对随机选取的三十多个散布颗粒的测量表明, 晶体 C 轴与长边垂直, 这与福克所说的“陡斜菱面体”不同.

电镜下被稀酸处理过的晶体显出许多大小较均匀的细小腐蚀空洞 (0.5—1μ 左右), 大致平行其延长方向分布 (图版 I, 5) . 在其粉末衍射图上与 NaCl 比较, 2.88Å 衍射峰漂移到了 2.902Å 的位置上, 这是白云石中部分 Mg 被 Ca 取代造成的. 按此差值计算得出晶体中 MgCO₃ 和 CaCO₃ 摩尔数之比为 45.3 : 54.7. 而化学分析给出的 MgO 却大大低于 CaO, 其镁钙摩尔比平均只有 0.53, 可替代 Mg 的 Fe、Mn 等成分很少, 不会对此比值造成影响 (表 1) . 上面提到, 被稀酸处理过的晶体有大量细小的腐蚀空洞, 这些空洞原先无疑是被方解石占据着. 化学分析结果中 CaO 的异常偏高很可能是这些方解石“包体”中有一部分在第一次酸分离时混到白云石中了. 从表 1 可见, 与方解石泥晶相比, 白云石中 Na、Fe、Mn、Ba 等含量较高, Sr 含量较低, 尤其是 Fe 和 Ba 高出方解石几十倍. 定性能散分析揭示米粒白云石内部 Ca、Mg 的分布大致是均匀的, 但在 Mg 分布图中仍有一些小区没有 Mg 显示, 而在 Ca 分布图中这些小区却是 Ca 的富集区, 这显然是白云石内细小方解石“包体”的反映 (图版 I, 7、8) . 定量能散分析也印证了 Ca、Mg 的这种分布特点 (表 2) . 在各个晶体内的不同测点上显示的 Ca 和 Mg 的含量没有很大差别, 除非测点落在方解石“包体”内或其边缘 (如表 2 中晶体 1 的点 2, 晶体 4 的点 1 等) .

在阴极射线照射下, 所有米粒状白云石均只呈非常暗的玫瑰红且很均匀, 只有极个别晶

表1 含米粒状白云石岩石成分的化学分析结果

Table 1 Chemical analysis of the rocks containing rice-shaped dolomite

样品	方解石			白云石+杂质			杂质			白云石 ⁽³⁾			
	HL-1	HL-2	平均	HL-1	HL-2	平均	HL ⁽¹⁾ -1	HL ⁽²⁾ -2	平均	HL-1	HL-2	平均	
Wt (%)	CaO	20.1	34.5	27.3	36.4	32.0	34.2	0.05	0.10	0.08	35.4	34.8	35.1
	MgO	1.25	3.19	2.22	12.6	16.3	14.5	0.59	0.66	0.63	12.5	14.3	13.4
	Na ₂ O	0.01	0.02	0.02	0.14	0.13	0.14	0.10	0.14	0.12	0.13	0.13	0.13
Wt (ppm)	Fe	117	353	235	2980	2770	2875	3200	7610	5410	2770	3480	3130
	Mn	16	37	27	74	81	78	22	24	23	72	94	83
	Ba	3	3	3	145	111	128	358	280	319	122	103	113
	Sr	83	117	100	72	28	50	36	34	35	69	42	56
Mol.Mg/Ca	0.09	0.13	0.11	0.48	0.71	0.60				0.49	0.57	0.53	

(1)杂质 / (白云石+杂质) = 6.4% (2)杂质 / (白云石+杂质) = 2.7% (3)结果由前二项计算所得

表2 米粒状白云石定量能散分析结果

Table 2 Quantitative analysis of rice-shaped dolomite with EDS

晶体号	测点及其位置		重量 (%)					Mg/Ca (mol)
			CaO	MgO	Feo	MnO	Na ₂ O	
1	边缘	1	57.00	41.66	0.44	—	0.91	1.02
		2	91.07	8.50	0.43	—	—	0.13
		3	61.95	37.08	0.98	—	—	0.83
		4	55.98	42.25	0.46	—	1.31	1.05
	5	58.09	40.79	1.12	—	—	0.98	
2	边缘	1	58.68	40.75	0.57	—	—	0.97
		2	58.51	39.53	0.64	—	1.32	0.94
		3	60.22	39.29	0.49	—	—	0.91
		4	57.83	41.47	0.50	0.20	—	1.00
		5	59.21	40.03	0.76	—	—	0.94
	6	58.28	41.15	0.58	—	—	0.98	
3	边缘	1	57.60	41.95	0.45	—	—	1.01
		2	58.38	41.11	0.51	—	—	0.98
		3	58.40	41.37	0.23	—	—	0.99
		4	56.92	42.89	0.19	—	—	1.05
		5	57.52	42.48	—	—	—	1.03
	6	59.45	39.99	0.19	0.37	—	0.94	
4	边缘	1	61.01	38.73	0.26	—	—	0.88
		2	55.35	42.59	0.18	—	1.88	1.07
		3	57.84	41.75	0.40	—	—	1.00
		4	58.99	39.10	—	0.35	1.56	0.92
		5	58.81	40.75	0.44	—	—	0.96
		6	56.40	43.60	—	—	—	1.08
	7	65.54	34.28	0.19	—	—	0.73	
5	边缘	1	58.71	40.47	0.82	—	—	0.96
		2	57.95	41.42	0.63	—	—	0.99
		3	58.19	41.25	0.38	0.18	—	0.99
		4	57.85	41.68	0.47	—	—	1.00
	5	57.15	42.34	0.50	—	—	1.03	
6	边缘	1	56.65	40.46	0.37	—	2.53	0.99
		2	56.45	40.97	0.53	—	2.06	1.01
		3	57.51	42.05	0.44	—	—	1.02
		4	57.27	42.44	—	0.29	—	1.03
	中心	5	56.66	42.52	0.56	0.26	—	1.04
		6	57.56	42.18	0.26	—	—	1.02
		7	56.34	41.55	0.37	—	1.73	1.03
7	边缘	1	57.04	41.61	0.41	—	0.93	1.02
		2	58.18	41.54	0.28	—	—	0.99
		3	57.41	42.21	0.38	—	—	1.02
		4	58.13	41.66	0.21	—	—	1.00
	中心	5	57.08	41.36	—	—	1.55	1.01
		6	58.26	40.50	0.17	—	1.06	0.97
		7	59.63	40.10	0.27	—	—	0.94
		8	59.41	40.59	—	—	—	0.95

体有一圈亮橙红色的线状周边或环带(方解石?)。这种发光的均一反映了白云石中 Mn^{2+}/Fe^{2+} 比的均一, 说明白云石化可能是在相对稳定的化学条件下一次完成的。

四、成因讨论

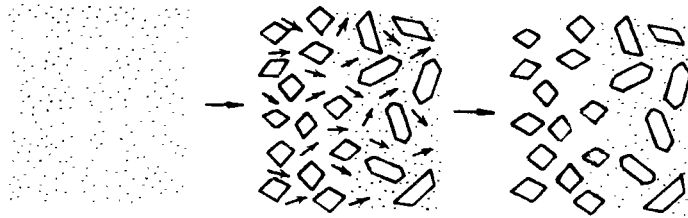
到目前为止, 几乎所有沉积白云石的自形晶都是菱面体, 如果白云石是某种非菱面体的自形晶, 则常会推测它是交代或溶解充填的结果。在薄片上, 米粒状白云石看来好象具有石膏晶体的假象, 但无论用交代还是用溶解充填的机理都无法解释晶体 C 轴的规则取向, 而且石膏也不会是拉长菱面体。碳酸盐矿物之间的交代不会改变原始的结晶方位, 但在天然产出和碳酸盐矿物中迄今还没有发现这种结晶方位的米粒形态。唯一已知的在外形上可与这种米粒形态相比的碳酸盐矿物是李普曼(1973)在实验室内合成的钡白云石 $BaMg(CO_3)_2$ 。但据此认为米粒状白云石是 Ca 替换了钡白云石中 Ba 的产物是有疑问的, 因为在钡白云石中, Ba 被 12 个氧环绕, Mg 不能占据 Ba 的菱形十二面体的位置, Ba 也不能占据 Mg 的八面体位置。而在白云石中, $CaMg$ 可沿三次轴方向间互地出现在任一个六次配位点上, 而且米粒状白云石中大量细小的方解石“包体”也不能用钙钡替换解释。再者, 这些包体大小比较均匀, 多少呈方向性分布, 也不象是交代残余。因此, 笔者推测, 这只能是一种特殊的白云石, 很可能是通过出溶作用形成的。

已经观察到, 并且实验室也证实了在变质条件下, 镁方解石可以出溶产生白云石和方解石的交生体, 二者均继承原始的结晶方位。阿尔索夫(1977)进一步用晶体化学证明, 控制镁方解石出溶反应的主要因素是压力而不是温度。他推测, 在正常海洋环境中, 压力的适度增加也可导致白云石从镁方解石中出溶出来, 这是发生在常温常压下的一种类似变质的过程。兰德(1967)也怀疑某些镁方解石质红藻易于白云石化可能与出溶作用有关。但是, 此外米粒状白云石大约只含 30% 体积的方解石包体(图版 I, 5)。假定这些包体方解石中的镁可以忽略不计, 那么按 X 衍射测定结果, 要出溶 $70\% Mg/Ca = 45.3:54.7$ 的白云石就需要原始镁方解石至少含 30% (mol.) 的 $MgCO_3$ 。然而在当今自然界, 除少数生物硬体外, 镁方解石最高只含有 15—20% (mol.) 的 $MgCO_3$ 。仅靠这些镁是不可能形成此处的米粒状白云石的。但另一方面, Ca^{2+} 离子半径 (0.99 Å) 比 Mg^{2+} 离子 (0.66 Å) 大一半, 在成分相同时, 镁方解石要比白云石占据更大的体积, 因而压力增加不仅有利于 $CaMg$ 的有序排列, 还有利于镁方解石中 Ca^{2+} 的排出, 环境中的 Mg^{2+} 也易于进入。换言之, 在压力增高的富 Mg 条件下, 镁方解石的出溶过程还可伴随一定量的离子交换, 因而白云石的出溶量可能会超过其原始出溶潜力。笔者推测, 米粒状白云石可能就是伴随有离子交换的出溶产物, 所谓的方解石包体只不过是一种出溶结构而已。

现在的问题是, 在现代海洋中, 直接沉淀的镁方解石均为微米级的泥晶或 C 轴与延长方向平行的纤维晶, 与这里的拉长菱面体还相去甚远, 因此, 在原生沉淀的镁方解石和出溶母晶之间可能还存在一个重结晶的转变过程。正是这一转变使得形态上受到歪曲的镁方解石变成了现在的拉长菱面体, 而这种拉长菱面体可能就是镁方解石真正的固有晶形, 其生长速度在顺结构层的方向上较快, 在垂直结构层的方向上相对较慢, 符合具层状结构的晶体在自由结晶时的一般生长趋势。至于被交切的三叶虫和腕足, 这里暂且只能假定其原始壳体也是镁方解石质的。已经知道镁方解石丢失镁向方解石转化可保留原始结晶形态, 因而还不能完

全排除现在为方解石纤状或片状结构的绝灭动物的硬体在沉积时为镁方解石质的可能。即使对现代生物,也只能根据泌骨组织特征大体解释构成骨骼的矿物形态,还不能解释其矿物成分。所以,这种交切可能仍是重结晶的结果。交切少见且较轻微说明骨骼中镁方解石的重结晶要比周围泥晶困难得多。镁方解石是最不稳定的碳酸盐矿物,它能否重结晶还难以断言,但如果环境条件能暂时阻止其中 Mg 的丢失,又有适当的触发动因,它的重结晶或许还是可能的。基于上述考虑,笔者认为一度充填在虫孔和内碎屑粒间的也是镁方解石泥晶,后来也经历了相同的重结晶和出溶过程。

米粒状白云石的大小和密集程度从虫孔向周围减小的现象似乎暗示这种重结晶是从虫孔部位向四周逐渐扩散开来的,因此重结晶的动因很可能就在准同生期或成岩早期的间隙水中,因为这时虫孔部位的渗透性优于周围泥晶。砾屑灰岩的情况也与此类似。但砾屑本身已有一定程度固化,渗透性较差,因而砾屑内部只出现少量细小的米粒状白云石。层序上,每一含米粒状白云石的岩层均被一层细晶白云岩覆盖,构成了一种双层式的韵律(图 2),这也意味着在准同生期有某种水溶液垂直向下渗透,造成上层沉积物完全白云石化而下层沉积物仅部分重结晶。这应该是一种性质特殊的水溶液。按一般的地球化学观点,白云石中贫 Sr 可能说明曾受淡水影响,重结晶和出溶还会使 Sr 进一步减少。相对较高的 Mn 也指示了淡水的参与。再结合考虑较高的 Na 含量(表 1),这很可能是海水和少量淡水的混合溶液。但显然这些都不是它的真正特殊性所在。



1. 镁方解石泥晶松散沉积 2. 准同生阶段特殊水溶液自上而下渗透使上层沉积物白云石化, 下层沉积物仅部分重结晶, 其余镁方解石泥晶向方解石转化 3. 成岩阶段压力增高, 镁方解石经出溶作用形成白云石和方解石的生体

图 3 米粒状白云石形成过程

Fig. 3 Formation of the rice-shaped dolomite

众所周知,除成分外,白云石和镁方解石最本质的差异还在于钙镁离子是否作有序排列。目前的看法是,在海水溶液中, Mg 的水合作用构成了比 Ca 更强的动力屏障,使它更难以在晶格中定位。过快的沉淀速度也使 CaMg 离子趋向无序排列。因此直接从海水中沉淀的只能是镁方解石、文石或方解石。在白云石化过程中,或者溶液的 Mg/Ca 比和 $\text{CO}_3^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 比很高,增加了 Mg 离子进入晶格的相对机率,或者具有一定 Mg/Ca 比的溶液被淡水稀释,减缓了沉淀速度。然而,这种理论要么只能解释进入晶格中 Mg 的数量,不能说明 Ca、Mg 离子排列的序性,要么只能解释 Ca、Mg 离子的序性,不能解释进入晶格中 Mg 的数量。正如莫柔(1983)指出的,要区分沉淀速度和溶液中 Mg/Ca 比值这两个因素对白云石形成的影响,还需要做更多的工作。就米粒状白云石只出现在双层式韵律下层的特征

看, 渗透溶液除具较高的 Mg/Ca 比以外, 其特殊性可能还在于它含有某种能释放化学能的物质, 它不仅可消除 Mg 离子的水合屏障, 还能使离子有序地进入晶格. 当含这种物质的水溶液自上而下渗透时, 上层沉积物迅速白云石化, 这种物质 (或其能量) 逐渐被消耗. 到达下层沉积物时, 它已是强弩之末, 只能在局部使 Mg 离子去水合而无力使离子行为序性化而造成部分镁方解石重结晶, 其余泥晶则失去镁向方解石转化 (图 3). 目前已知某些阳离子 (如锂, 可能还有铁) 对白云石沉淀可起催化作用, 这也许是这种物质存在的一个信号. 是否还有其它物质也具有这种作用现在还不甚了了. 米粒状白云石中 Ba 的高度富集使笔者怀疑这种物质可能是 Ba 的某种化合物. 但这一结论显然还需有更直接的证据.

感谢加拿大雷克亥得大学中心实验室的 Tom Griffith 博士和 Al Mackenzie 为 X 衍射、扫描电镜和能散分析给予的协助以及 Sam Spivak 和 Sandra Millar 为部分图件的绘制和原稿打印付出的辛勤劳动.

收稿日期: 1990 年 6 月 30 日

参 考 文 献

- (1) 莫柔, D.W., 1983, 国外地质科技 (地矿物情报研究所), 1984年第6期, 3-13页, 第7期, 1-13页.
- (2) 邬金华, 1989, 出溶白云石, 地质科技情报 (中国地质大学), 第4期, 31-34页.
- (3) Althoff, P.L., 1977, Amer. Mineral., V.62, p.772-783.
- (4) Blatt, H., Middleton, G. and Murray, R., 1980, Origin of sedimentary rocks, second edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey p.782.
- (5) Goldsmith J., 1960, Jour. of Geology, V.68, p.103-109.
- (6) Land, L.S. and Epstein, S., 1970, Sedimentology, V.14, p.187-200.
- (7) Lippmann, F., 1973, Sedimentary carbonate minerals, Springer-Verlag, New York, p.228.

Rice-shaped Dolomite and Its Exsolution Origin

Wu Jinhua

(China University of Geosciences)

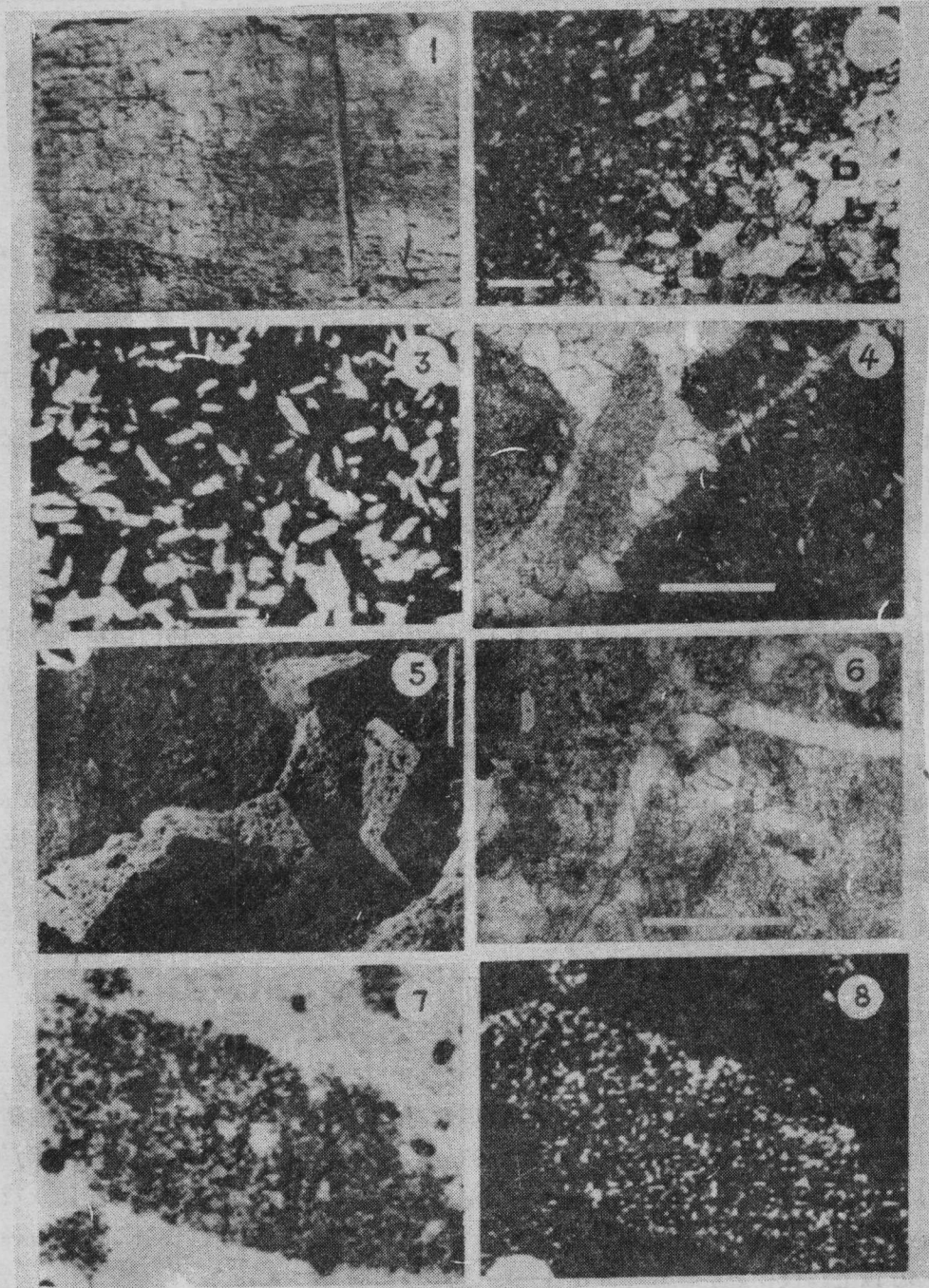
Philip Fralick

(Geology Department, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Canada P7B 5E1)

Abstract

Rice-shaped dolomite crystals exist in dolomite-patched micritic, biomicritic, intraclastic and stromatolitic limestones in an Ordovician nearshore, carbonate succession, reaching their highest concentrations proximal to worm burrows and pore space between intraclasts. The crystals are elongate rhombohedra and appear to be elongate hexagons, parallelograms or trapezoids and look like rice grains in thin sections. No internal zoning or foggy cores are present but numerous minute calcite "inclusions" distrib-

ute parallel to the boundary of the crystals. The C-axis is perpendicular to the longer boundary of the crystal. It contains higher Fe, Mn, Na and Ba than surrounding calcite micrite which contains a greater proportion of Sr. especially its Fe and Ba are tens of times higher than those of calcite. C-axis orientation negates the dolomite representing replacement of gypsum. It can not be created by an ordinary dolomitization or the replacement of norsethite and is suggested to form in a process that the precipitated magnesian calcite is recrystallized into its inherent crystallographic shape, then followed by exsolution accompanied by exchange of calcium for magnesium ions under conditions of increased pressure. The agent triggering the recrystallization of magnesian calcite is probably in penecontemporaneous of early diagenetic interstitial water with high Mg / Ca ratio, in which there may be some substance that can release chemical energy not only to dehydrate Mg^{2+} but also to order the entering of the ions into lattice. As the water solution permeates the sediments downward and upper layers are dolomitized, the substance (or its energy) is consumed gradually, the concentration of which could become as less as can only carry out dehydration of local ions but can not make the activity of the ions ordered when the solution reaches the lower layers. As a result, parts of magnesian calcite in the lower sediments are favoured to grow up transforming to their inherent crystallographic shape. **Some Ba** compound seems to be a candidate for the substance.



1. 虫孔状云斑泥晶灰岩, 米粒状白云石赋存的主要岩石类型。 2. 虫孔状云斑泥晶灰岩, 右下角为虫孔部位, a 为典型拉长菱面体, b、c 为虫孔内部较胖的拉长菱面体。单偏光, 白线长 0.2mm。 3. 云斑叠层石灰岩, 白云石均为拉长菱面体, 长轴无定向。单偏光, 白线长 0.2mm。 4. 云斑砾屑灰岩, 米粒状白云石在粒间粗大, 密集, 在粒内细小, 稀疏。单偏光, 白线长 1mm。 5. 扫描电镜下的米粒状白云石, 方解石包体腐蚀后留下的空洞大致沿与黑色箭头垂直方向排列。白线长 20 μ 。 6. 生屑泥晶灰岩, 中部勾状三叶虫碎片被米粒状白云石交切。正交偏光。白线长 0.4mm。 7. 米粒状白云石的 Ca 分布图。白色表示 Ca。 8. 米粒状白云石的 Mg 分布图, 白色表示 Mg。