

文章编号: 1000-0550(2008) 06-0957-10

塔里木盆地中央隆起区上寒武统一下奥陶统白云岩储层中两类白云石充填物: 特征与成因¹

张军涛¹ 胡文瑄¹ 钱一雄² 王小林¹ 朱井泉³ 张洪安² 苏娟² 吴仕强³

(¹ 南京大学地球科学系内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 南京 210093

² 中国石油化工股份有限公司 勘探西北分公司 乌鲁木齐 830011; ³ 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘要 在塔里木盆地中央隆起区, 下古生界白云岩储层中的白云石充填物从形态上可分为菱形和鞍状两类, 它们具有不同的岩石学特征, 菱形白云石内部结构简单均一, 而鞍状白云石内部结构比较复杂, 由内核、环带和外缘三部分组成。地球化学组成分析表明, 菱形白云石可能形成于成岩作用的早期, 成岩物质可能来源于改造的海水, 其沉淀是一个相对稳定的过程, 后期仅少量受到富铁流体的改造。而鞍状白云石的形成则可能与断裂诱发的深部热流体活动密切相关, 其物质可能来源于深部热液在运移过程中对围岩白云石的溶解, 鞍状白云石内部复杂的结构可能反映了断裂的幕式活动。因此, 两类白云石充填物反映了不同的成岩流体环境, 特别是鞍状白云石很可能是热液溶蚀作用发生的重要标志。在白云岩储层研究中, 今后需要进一步深入详细分析充填物的产状、充填作用发生的时间和机制, 对于研究分析白云岩储层形成机制和储层预测都有重要意义。

关键词 鞍状白云石 菱形白云石 上寒武统一下奥陶统 中央隆起区 塔里木盆地

第一作者简介 张军涛 男 1981 年出生 博士研究生 能源地质学 E-mail: bta_zhang@gm ail. com

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

油气勘探和地质研究表明, 全球约有一半的碳酸盐岩油气储层岩性以白云岩为主^[1, 2]。因此, 研究白云岩储层的成岩演化与储层质量成为众多石油地质工作者关注的重要内容。其中, 白云石充填物作为白云岩储层中的一种重要充填物类型, 可能记录了白云岩成岩作用的一些重要过程, 因而成为近来研究的重点对象^[3-4]。研究发现, 白云岩储层中的白云石充填物除了堵塞孔隙喉道, 降低储层质量外, 不同的白云石充填物还可以反映不同的成岩流体环境^[5-10]。

塔里木盆地中央隆起区指位于盆地中央部位的中央隆起和柯坪隆起, 本区下奥陶统一下寒武统发育有一套厚达千米的白云岩层系, 在这套白云岩中已发现了塔中 162 井等油气藏, 初步展示了良好的油气勘探远景。因此, 研究该区的白云岩储层已成为众多学者关注的热点问题, 相关工作可主要归纳为两类, 一是通过分析白云岩的地球化学特征, 研究白云岩的成因机理并分析其对储集性能的影响^[11-14]; 二是通过分析白云岩储层的岩相学特征, 研究白云岩成岩过程对储集物性的改造^[15-18]。目前普遍认为, 本区白云岩储层的形成是多期次、多种类型地质过程综合作用的

结果, 受控于原始的沉积相带、白云岩化作用、溶蚀作用以及断裂活动等, 其中溶蚀孔洞是主要的储集空间, 溶蚀作用是影响区内白云岩储层发育的最主要因素^[19]。

然而, 对于可能记录了白云岩储层成岩演化全过程的充填物, 至今却少有工作开展专门性的解剖分析, 仅是在储层描述时普遍认为其降低了储层物性, 导致对控制储层发育的溶蚀作用过程与特征认识仍不很清楚。本文旨在前人工作基础之上, 从新的角度, 即基于分析白云岩储层中白云石充填物的基本地质与地球化学特征, 试图查明其成因, 目的是揭示白云岩储层成岩过程中的构造演化与流体活动之间的联系, 并初步讨论其对储层物性的影响, 以期为区域油气深入勘探提供新的基础信息, 并为白云石成因这一重要基础科学研究课题提供新的参考资料。

1 地质背景

塔里木盆地中央隆起区位于盆地中部, 夹持在北部坳陷、西南坳陷和东南隆起之间, 总体呈近东西向展布(图 1), 包括中央隆起和柯坪隆起。本次研究的

¹ 国家科技部基础研究发展规划(973)项目(编号: 2005CB422103)资助。
收稿日期: 2008-01-10 收修改稿日期: 2008-04-17

白云岩主要是发育于上奥陶统和下奥陶统的白云岩 (图 2)。下奥陶统自上而下由鹰山组和蓬莱坝组组成。鹰山组上段为纯灰岩段。鹰山组下段和蓬莱坝组为白云岩与灰岩互层段,且向下白云岩层逐渐变厚。上奥陶统丘里塔格下亚群为白云岩段。这套白云岩层系之下为中寒武统的蒸发岩沉积,并夹有泥岩和白云岩。下寒武统为厚层的白云岩,其间偶见页岩和灰岩。

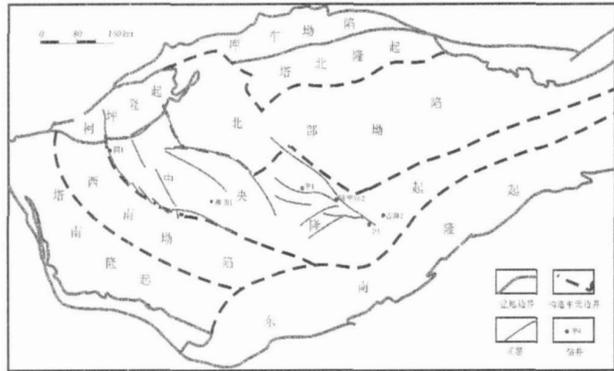


图 1 塔里木盆地构造单元划分示意图

Fig. 1 Sketch map showing tectonic units in Tarim Basin

中央隆起区经历了从震旦纪到第四纪漫长的地质演化,断裂与热液活动频繁,尤以二叠纪晚期最为强烈^[20~24]。分布于中央隆起中部的一系列逆冲断层是在早海西期形成。至晚海西期,区域构造作用的影响区域迁移到了西部,发育了大量的张性断裂,伴随着强烈的岩浆热液活动^[24]。中央隆起西邻的柯坪隆起,其与中央隆起西部在古生代是一体的^[25],具有相似的构造演化史,到喜马拉雅运动期,柯坪隆起才以逆冲推覆构造形式与中央隆起断开,从而形成了现今两个不同的构造单元。

2 储层白云石充填物的岩相学特征

白云石是本区白云岩储层中的主要充填矿物之一,并通常与方解石、石英等矿物共生 (图 3)。其中,白云石、方解石、白云石-石英和白云石-方解石是最为常见的共生矿物组合。在白云石-方解石,以及白云石-石英等的矿物组合中,白云石通常为第一期充填物,而方解石和石英为后期充填物,典型代表如图 3b。按白云石的晶体形态特征,本区内白云岩中白云石充填物可分为菱形白云石和鞍状白云石两类 (图 4 图 5)。

2.1 菱形白云石

菱形白云石在区内白云岩中分布普遍,岩心上可

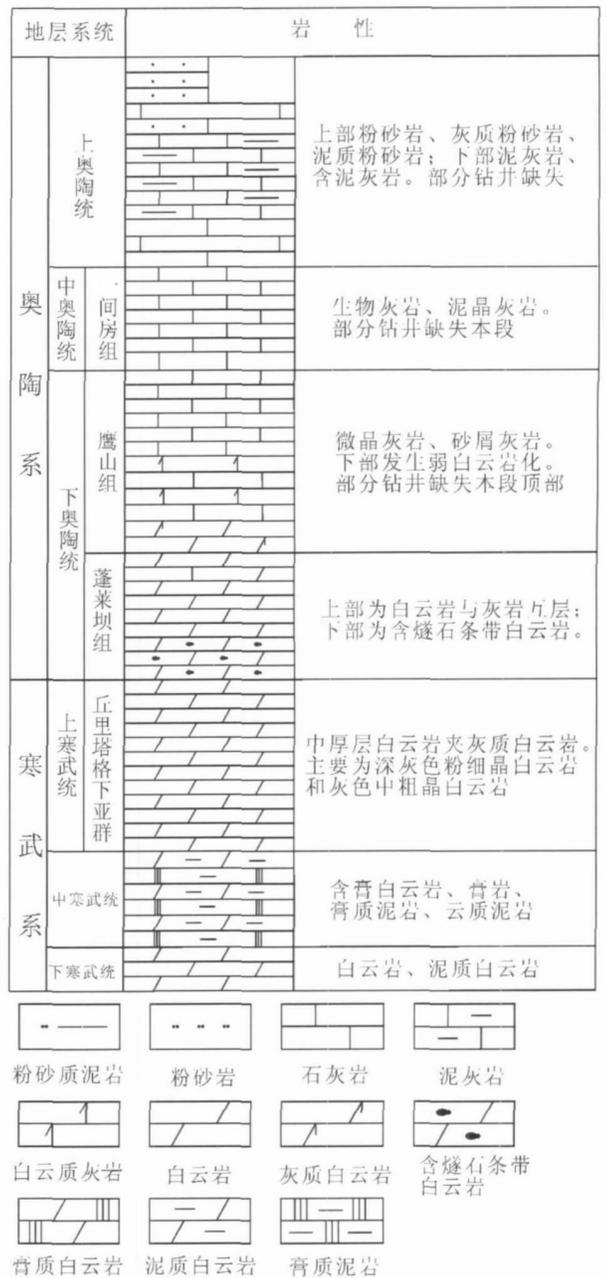


图 2 塔里木盆地中央隆起区寒武系—奥陶系地层示意图

Fig. 2 Simplified lithostratigraphic section of the Cambrian-Ondovician rock sequence in the central uplift area of Tarim Basin

直观地通过颜色较浅将其与基质白云石区分开来 (图 4a)。显微镜下进一步观测发现,菱形白云石充填物与基质白云石之间的边界不甚明显,有时以次生加大的方式生长在基质白云石之上,晶体多为较规则的菱面体,表面较为干净,并且与岩心上所观测到的一样,较基质白云石纯净透明 (图 4a)。电子探针背散射图像观测发现,菱形白云石充填物环带不发育,晶体内部基本不含方解石包裹体 (图 4b-d)。有时

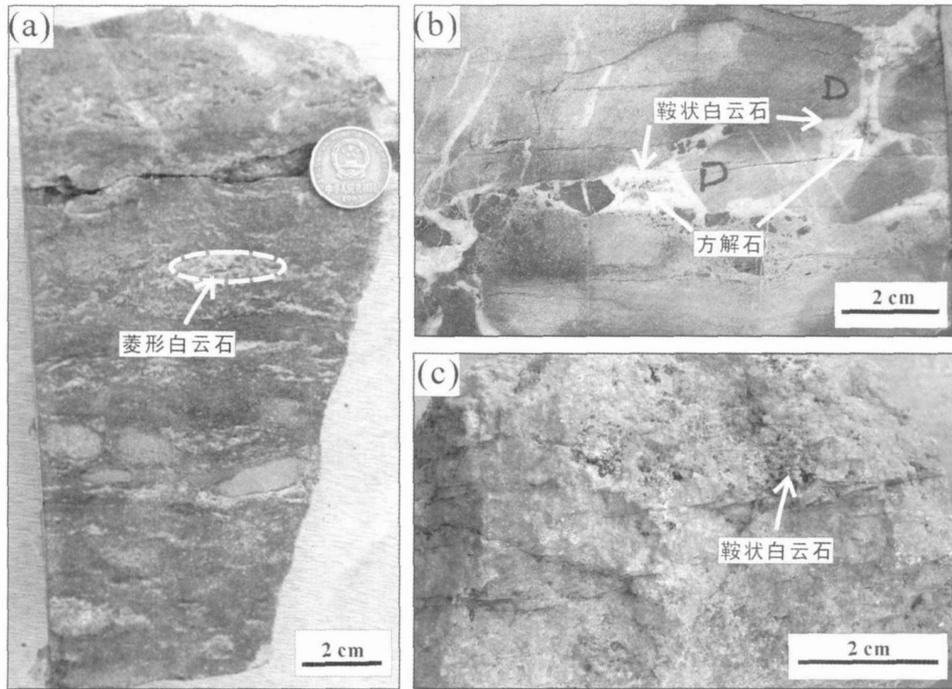


图 3 塔里木盆地中央隆起区上寒武统一奥陶统典型储层白云石充填物的岩相学发育特征
 (a) 致密的白云岩中发育的菱形白云石, 和田 1 井, 上寒武统; (b) 发育在白云岩裂隙上的齿状白色鞍状白云石, 其后又为方解石充填, 中 4 井, 上寒武统; (c) 中一粗晶白云岩的孔洞内发育的鞍状白云石, 同 1 井, 上寒武统。

Fig. 3 Petrographic characteristics of the dolomite filling of the Upper Cambrian-Lower Ordovician in the central uplift area, Tarim Basin

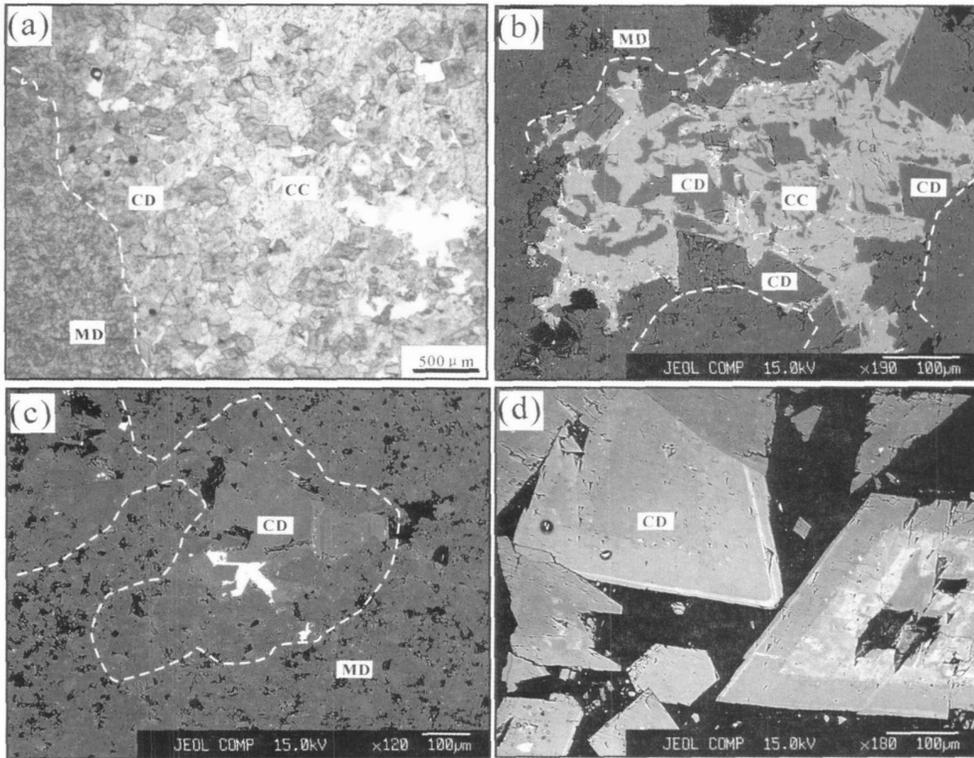


图 4 塔里木盆地中央隆起区下古生界典型储层白云石充填物的显微特征
 (a) 菱形白云石, 孔隙后又为方解石完全充填, 中 1 井, 上寒武统丘里塔格下亚群。 (b) 菱形白云石后期被方解石交代, 发生去白云岩化充填白云石被方解石交代, 去白云岩化, e3q-47, 柯坪隆起蓬莱坝剖面; (c) 菱形白云石晶体内部较为均一, 边缘颜色较浅, 后又为方解石完全充填, e3xq-56, 柯坪隆起蓬莱坝剖面; (d) 晶体内部较为均一。晶体边缘呈一条亮色的细条纹。个别晶体内部也为亮色。T1-07-3, 同 1 井, 上寒武统丘里塔格下亚群。CD 为白云石充填物, MD 为基质白云石, CC 为方解石。

Fig. 4 Photomicrograph electron image of rhombus dolomite filling of the Upper Cambrian-lower Ordovician in the central uplift area, Tarim Basin

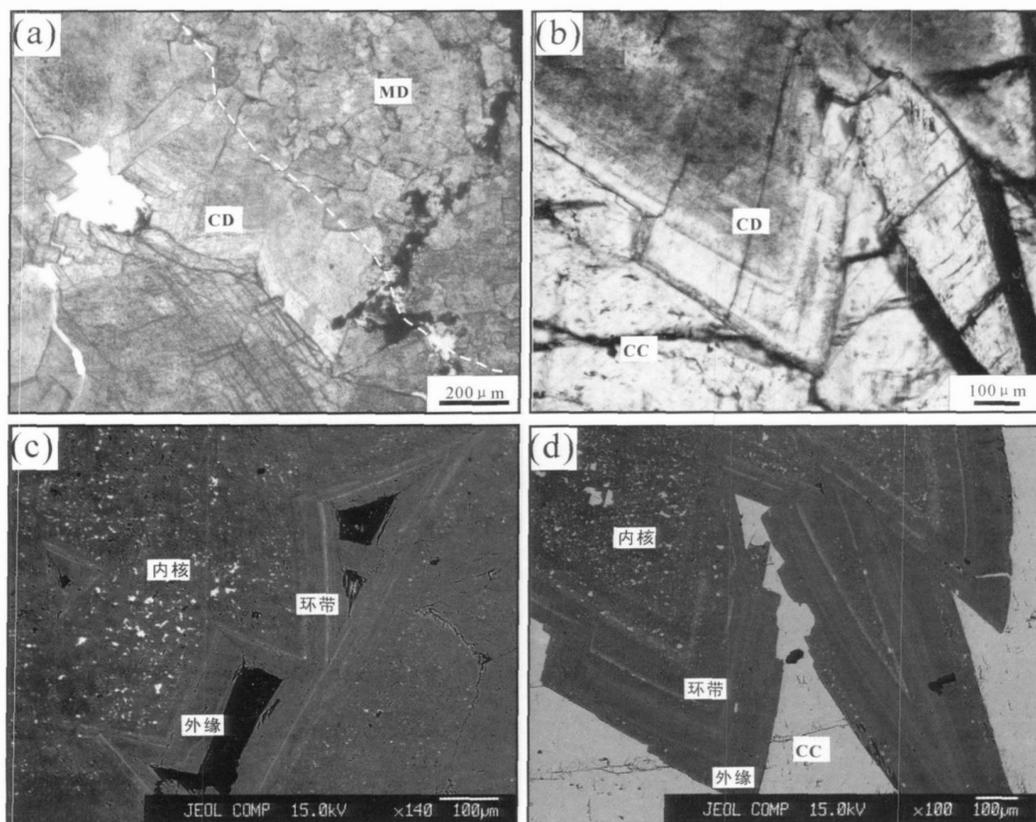


图 5 塔里木盆地中央隆起区上寒武统一奥陶统白云岩储层中鞍状白云石的背散射图像

(a) 裂隙中发育的鞍状充填白云石, 晶体多为粗晶—巨晶, 与细晶的基质白云石具有明显的差异, O1P-94, 柯坪隆起野外剖面, 下奥陶统蓬莱坝组。(b) 为鞍状白云石在单偏光下的图像, 晶面弯曲, 波状消光, TO1-27 同 1 井, 上寒武统丘里塔格下亚群。(c) 具环带结构的白云石, 环带不均一生长, O1P-96a 柯坪隆起野外剖面, 下奥陶统蓬莱坝组。(d) 为 (b) 的背散射的图像: 在背散射电子像下晶体的内核与内环带对应于显微镜下晶体的雾心, 晶体外环带与外缘分别对应于显微镜下晶体的亮边, 晶面弯曲, 具多期环带, 溶蚀边。图中, CD 为白云石充填物, MD 为基质白云石, CC 为方解石。

Fig 5 Photomicrograph of saddle dolomite filling of Upper Cambrian—lower Ordovician dolostone in the central uplift area, Tarim Basin

还能发现, 晶体的颜色由内向外逐渐变浅, 晶体边缘还有一条亮色的细条纹, 也有少量的此类晶体内部也呈浅色, 但这类晶体往往会有一条细脉与边缘的条纹相连(图 4d)。此外, 如图 5h 部分孔隙菱形白云石充填物后期又被方解石交代, 发生去白云岩化。

2.2 鞍状白云石

鞍状白云石多见于区内上寒武统丘里塔格下亚群, 常发育在断层附近的中—粗晶白云岩中。颜色多为乳白色或青灰色, 呈齿状产出于白云岩的裂隙和孔隙中(图 3h, c)。晶体多为粗晶, 甚至能达到巨晶。具有弯曲的晶面, 在正交光下波状消光。晶体一般具有“雾心亮边”结构, 即内部因富含细小的包裹体, 而呈“雾心”; 晶体外缘是一个干净的加大边, 与晶体内部有明显的差异。晶体也常具有环带结构, 环带是多成分的差异, 有时也是包裹体含量的差异(图 5a, b)。

鞍状白云石具有非常复杂的结构。典型的鞍状

白云石晶体由内核、环带和外缘三部分组成(图 5c, d)。在背散射图像中, 三部分具有较大的差异。但由于具体形成条件的差异, 鞍状白云石晶体三部分可能发育得并不完整。

晶体内核颜色较暗, 见白色方解石包裹体, 呈星点状散布, 形状不规则, 大小不等, 粒径一般约几微米左右。此外, 还可观测到许多极小的孔隙(仅有几微米), 为后期流体的进入与可能的成岩改造提供了孔隙空间。

鞍状白云石晶体的环带又可分为内环带和外环带。内环带由暗色与亮色条纹相间而成。每个条纹都具有不等的宽度, 并且同一条纹在不同位置宽度也不相同。内环带内含大量的方解石包裹体, 但包裹体的数量少于晶体内核。相比较而言, 外环带则为夹有亮色细条纹的暗色层。外环带内的条纹结构较复杂: 大部分条纹为连续的线形, 但也有少量的亮条纹呈锯

齿状和台阶状, 甚至发生错断。亮色条纹宽度一般小于暗色层, 并且条纹的宽度在不同部位也有变化。亮暗条纹的界线一般地比较明显, 且在亮暗条纹边界发育有溶蚀边。外环带内基本不含方解石包裹体。在背散射电子像下晶体的内核与内环带, 对应于显微镜下晶体的雾心(图 5h d)。

外缘是鞍状白云石晶体的最外层, 也是暗色层, 无环带结构。内部较为均一, 但也有部分外缘含方解石包裹体(图 5c d)。外缘宽度在晶体的不同部位也有所差异。在背散射电子像下晶体外环带与外缘, 对应于显微镜下晶体的亮边(图 5h d)。

3 白云石充填物的地球化学特征

白云石充填物内的元素地球化学特征反映了成矿流体的物质组成。利用电子探针测试白云石的元素组成(表 1), 可在岩相学特征的基础上, 进一步分析充填物内部结构的差异, 进而探讨流体的性质和演化。

3.1 Ca/Mg

白云石充填物的 Ca/Mg 反映了成矿流体中 Mg 的含量, 是研究流体来源的重要指标。如图 6 白云石充填物具有与基质白云石不同的 Ca/Mg 比值。基质白云石的 Ca/Mg 比值分布比较局限, 集中在 1.12 ~ 1.16 之间。相比而言, 白云石充填物的 Ca/Mg 范围则要大多, 从 1.0 ~ 1.2 之间皆有分布, 说明白云石充填物形成过程中流体性质的复杂多变。具体到不同产状的白云石充填物, 首先, 菱形白云石的 Ca/Mg 多位于 1.10 ~ 1.18 之间, 并且晶体内部的 Ca/Mg 比值略低于晶体外部, 与基质白云石 Ca/Mg 值基本相近, 稍有降低; 其次, Ca/Mg 值在鞍状白云石晶体内部也有差异, 其中内核的 Ca/Mg 值最低, 在 1.04 ~ 1.12 之间。外缘的 Ca/Mg 略低于基质白云石, 而环带的 Ca/Mg 值变化较大, 在 1.06 ~ 1.18 都有分布, 这充分展示了鞍状白云石充填物形成过程的复杂性。

3.2 微量元素 Fe Mn Ba

基质白云石中的 FeO 含量非常低, 最高值仅为 0.09%。两类白云石充填物的 FeO 含量也有明显的不同(图 6)。菱形白云石晶体 FeO 含量一般低于 0.5%, 仅有个别测点具有高的 FeO 含量, 最高可达 2%, 这恰好对应于个别晶体边缘亮色细条纹(图 4d)。鞍状白云石晶体中一般都含有一定量的 FeO, 但在晶体内的分布却非常不均一, 多集中分布于环带部分, 甚至可达 5.9%, 而在晶体的内核和外缘 FeO

含量都较低。基质白云石和两类白云石充填物中, FeO 含量与 Ca/Mg 相关性都较小。

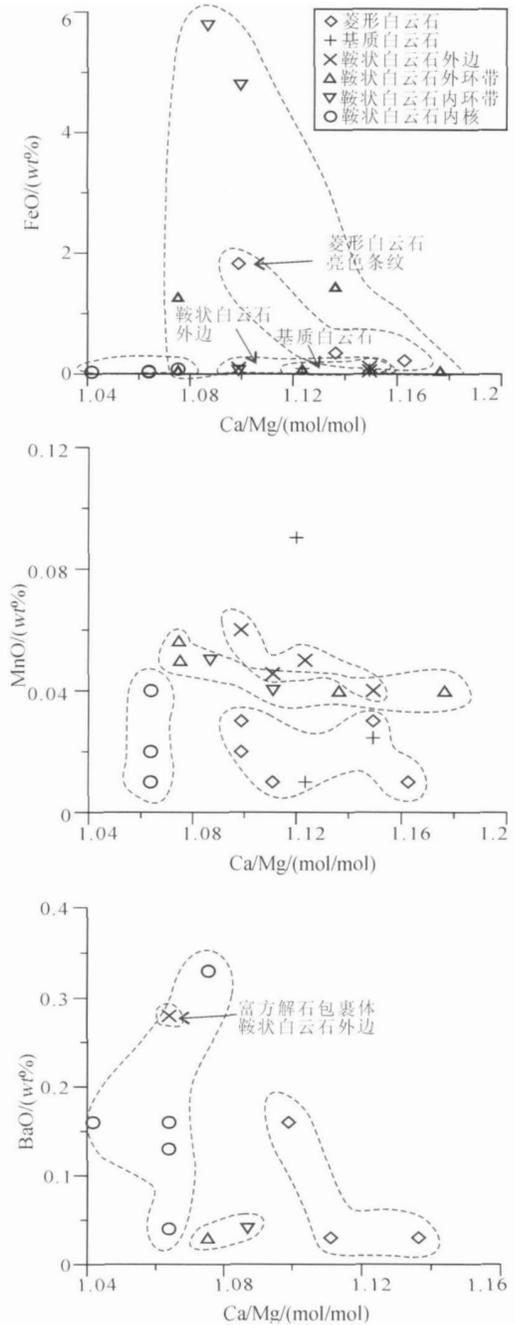


图 6 塔里木盆地中央隆起区上寒武统一下奥陶统白云岩储层中 Fe、Mn 和 Ba 含量与 Ca/Mg 交会图由表 1 数据绘制而成
Fig 6 Ca/Mg (in mol/mol) to Fe, Mn and Ba concentration (in wt%) for dolomite of Upper Cambrian-lower Ordovician dolostone in the central uplift area, Tarim Basin

MnO 在基质白云石和白云石充填物中, 含量都较低(图 6)。三个基质白云石的 MnO 含量分别为 0.01%、0.03% 和 0.09%。菱形白云石中最高值仅为

表 1 塔里木盆地中央隆起区白云岩储层中白云石充填物的地球化学数据
 Table 1 Geochemical data of void-filling dolomites of the Upper Cambrian-Lower Ordovician dolostone in the central uplift area, Tarim Basin

样品号	井号	深度 /m	层位	CaO	MgO	FeO	MnO	BaO	SrO	Total	Ca/Mg	样品类型	
				w %	w %	w %	w %	w %	w %	w %	w %		mol/mol
T1-07-3	同 1 井	3181.4	上寒武统	31.05	20.90	-	-	-	-	52.00	1.06	菱形白云石	
				31.02	20.90	-	0.01	-	0.01	52.01	1.06		
				30.50	19.75	1.82	0.03	0.16	-	52.28	1.10		
				30.68	21.11	0.14	0.03	-	-	52.02	1.04		
				31.22	20.70	0.01	0.01	-	0.01	52.01	1.08		
T1-07-7	同 1 井	3177.9	上寒武统	31.91	19.89	0.11	0.04	-	0.02	52.02	1.15	鞍状白云石	外缘 环带
				31.09	19.56	1.42	0.04	-	-	52.23	1.14		
T1-3-8	同 1 井	3177.0	上寒武统	31.00	20.80	-	-	0.16	0.01	52.00	1.06	鞍状白云石	内核 外缘
				32.60	20.24	0.05	-	-	0.03	52.95	1.15		
T1-07-11	同 1 井	3176.0	上寒武统	30.72	19.96	0.09	0.06	-	-	52.00	1.10	鞍状白云石	内核
T1-07-16	同 1 井	3173.5	上寒武统	30.97	20.89	-	0.02	0.04	0.01	52.02	1.06	鞍状白云石	内核 内环带 外缘 内环带
				28.34	18.61	5.77	0.05	0.04	0.01	52.84	1.09		
				31.08	20.73	-	0	-	-	52.02	1.08		
				31.57	20.33	-	0.04	-	0.01	52.01	1.11		
T1-07-27	同 1 井	3172.5	上寒武统	31.30	20.65	0.01	-	-	0.02	52.00	1.09	鞍状白云石	外缘 环带 内环带
				30.79	20.70	-	-	0.28	-	52.04	1.06		
				31.09	20.54	0.04	0.06	-	0.03	52.03	1.08		
Zh4-07-35	中 4 井	3612.5	上寒武统	28.97	18.72	4.59	0.01	-	0.03	52.47	1.10	菱形白云石	
				30.32	21.07	-	0.04	-	-	52.00	1.03		
Zh4-07-42	中 4 井	5812.7	上寒武统	31.16	20.63	0.01	-	0.16	0.01	52.00	1.08	鞍状白云石	外缘 内核 内核
				32.23	20.63	-	0.04	-	0.03	52.97	1.11		
				31.36	21.01	0.04	0.01	0.13	0.01	52.58	1.06		
Zh4-07-43	中 4 井	5811.6	上寒武统	31.24	20.82	0.08	-	0.33	0	52.51	1.08	鞍状白云石	内核 环带 环带 外缘
				31.51	20.30	0.05	0.01	0.06	0.02	52.00	1.11		
				32.57	19.71	0.03	0.04	-	0.02	52.40	1.18		
				30.48	20.23	1.25	0.05	0.03	0.01	52.10	1.08		
				31.77	20.10	0.06	-	-	0.01	52.00	1.12		
Zh4-07-57	中 4 井	5969.3	上寒武统	31.80	20.04	0.02	-	-	-	52.01	1.14	鞍状白云石	内核 外缘 外缘
				30.68	21.08	0.03	-	0.16	0.02	52.01	1.04		
				31.65	20.18	0.04	0.05	-	0.03	52.02	1.12		
O1p-84	柯坪隆起 蓬莱坝剖面		下奥陶统 蓬莱坝组	31.46	20.36	-	-	-	0.01	52.02	1.10	菱形白云石	
				31.30	20.34	-	0.02	-	0.02	52.01	1.10		
				31.96	20.53	-	0.01	0.03	0.05	52.63	1.11		
				32.12	19.98	-	0.03	-	0.02	52.63	1.15		
O1p-95b	柯坪隆起 蓬莱坝剖面		下奥陶统 蓬莱坝组	32.04	19.69	0.22	0.01	-	0.01	52.01	1.16	基质白云石 基质白云石 鞍状白云石	内核 外缘
				32.14	19.86	0.06	0.03	-	0.01	52.15	1.15		
				30.42	21.23	0.04	0.09	-	0.05	52.75	1.12		
E3q-56	柯坪隆起 蓬莱坝剖面		上寒武统	31.27	20.93	0.03	0.04	-	-	52.30	1.06	鞍状白云石	内核 外缘
				28.92	22.84	-	-	0.06	0.02	51.99	0.90		
				31.66	20.12	0.09	0.01	-	0.03	51.51	1.12		
				30.38	20.31	0.17	0.01	0.16	0.02	52.00	1.06	基质白云石 菱形白云石	
				31.54	19.81	0.35	-	0.03	0.02	51.77	1.14		

0.03%, 富 Fe 的区域也往往有一定的含量的 MnO。MnO 在鞍状白云石晶体中的分布有一定的差异, 外缘的含量最高, 环带次之, 内核的最低。基质白云石和白云石充填物中, MnO 含量与 Ca/Mg 的相关性不大。

BaO 在基质白云石中含量非常低, 多低于检测限

(图 6)。在两类白云石充填物中, 菱形白云石的 BaO 含量变化范围较大, 富 FeO 的测点往往含有一定量的 BaO。鞍状白云石各部分的 BaO 含量有一定的差异。其中环带中的 BaO 含量大部分低于检测限。而内核基本上都含有一定量的 BaO, 最高值为 0.33%。

外缘的大部分测点也低于检测限, 仅有一个较高的值为 0.28%, 而这恰好对应于与内核性质相近的富方解石包裹体的外缘(图 5d)。基质白云石和白云石充填物中, BaO 含量与 Ca/Mg 的相关性不大。

4 白云石充填物成因与孔隙演化

流体演化控制着白云石充填物晶体的生长方式, 晶体生长方式又决定了白云石充填物的复杂结构。因此, 白云石充填物的内部结构反映了复杂的地质过程, 并且这个地质过程与白云岩的孔隙演化有密切的联系。

4.1 菱形白云石的成因

有报道指出, 菱形白云石的形成温度较低, 通常低于 50°C [26, 27], 因此这类白云石很可能形成于浅埋藏环境。其内部结构较为均一, 反映了沉淀过程是相对稳定的。在埋藏条件下, 形成白云石的可能物质来源有: 孔隙内残余海水、高镁方解石调整和白云石的溶解等 [28]。高 Mg 方解石调整形成的白云石的同时, 会生成大量的低 Mg 方解石, 本区内菱形白云石内缺乏方解石, 因此菱形白云石不可能形成于高 Mg 方解石调整。大气降水和深部流体会使 Mn 含量增加 [20, 29], 而菱形白云石的 Mn 含量略低于基质白云石, 说明菱形白云石形成时既未受到深部流体作用,

也未受到大气降水影响。先前研究普遍认为, 本区白云岩的成因属于准同生白云岩化 [11-14, 19], 流体来源为浓缩海水。如前所述, 菱形白云石与基质白云石特征相似, 亦说明流体来源与基质白云石相近。因此, 可推测其流体来源最有可能为孔隙内的残余海水。前人的研究也表明该区曾受到过深部热流体的改造 [20, 21], 而富 Fe, Ba, Mn 的条纹也应是受后期深部流体改造的结果。综上, 菱形白云石的流体来源于孔隙内残余海水, 形成于较为稳定的浅埋藏条件下, 仅有个别部位受到过后期热液的改造。

4.2 鞍状白云石的成因

鞍状白云石多形成于温度高于 80°C 的热液环境中 [30-32]。区内白云岩中的鞍状白云石发育段多集中于断层附近。鞍状白云石晶体内复杂的环带结构, 以及晶体内 Fe, Mn, Ba 元素含量和 Ca/Mg 比值的变化, 反映了一个流体性质频繁变化的过程, 这可能与断层的幕式活动相关。由高镁方解石调整形成的白云石一般形成于成岩作用的早期, 这与鞍状白云石形成的时间不一致。来源于孔隙残余海水的白云石一般具有相对较高 Ca/Mg 值, 而鞍状白云石中的 Ca/Mg 值稍低。因此, 深部流体运移过程中对白云石的溶解是其最有可能的 Mg 来源。因而可推断, 该类白云石的沉淀可能与断裂诱发的深部高温流体活动有关(图 7)。

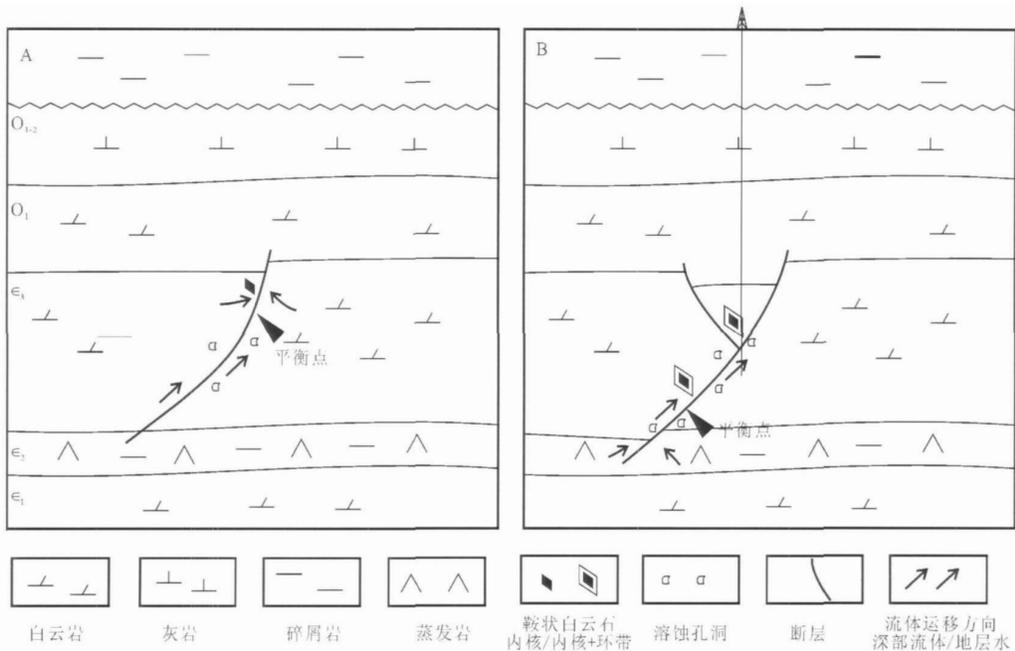


图 7 鞍状白云石发育模式简图

A 为断裂初期, B 为断裂强烈活动期, 箭头为沉淀与溶解的平衡点

Fig 7 Schematic model for saddle dolomite in the central Tarim Basin

内核具有较低的 Ca/Mg 值,且富含方解石包裹体。Leach 等^[33]研究表明,流体中的 CO_2 沸腾析出是控制白云石充填物沉淀的主要因素。当断裂开启时,深部流体沿断裂迅速上涌,上升过程中伴随着与地层流体混合以及对围岩的溶蚀。当上升到一定的深度时,压力和温度下降到一定值,流体中 CO_2 大量析出,同时溶解和沉淀平衡发生转变,从而使得方解石和白云石同时饱和,快速沉淀(如图 7A)。由于 Ba 元素易于从流体中进入白云石晶格,所以只有在沉淀的初期才能使 Ba 元素在内核中富集。内核中较低的 Mn 含量,则因为地层水的混合,使得深部热液的影响减弱。因而,鞍状白云石的内核可能形成于断裂活动的早期,流体可能为混合了地层水的深部流体(如图 7A)。

鞍状白云石晶体环带中富集 Fe,但基质白云石中 Fe 的含量却很低,这说明鞍状白云石中的 Fe 不可能来源于白云石本身的调整,同时鞍状白云石的环带和外缘的形成温度要高于内核形成温度^[9],因此其形成流体可能来源于更深的具有更高温度的,穿越了富 Fe 岩层的流体^[34](如图 7B)。较快的沉淀速度以及地层水的掺入也造成了内环带内含方解石包裹体,但沉淀速度较初期开始变缓,表现为包裹体的大小和数量都有所减少。当压力和温度减小到仅能使白云石发生沉淀时,就形成了基本不含方解石包裹体的外环带。断裂活动期的幕式活动造成了流体性质的变化,使得环带内 Fe 含量产生差异,表现为相间的亮暗条纹。

断裂活动的末期,流体性质渐趋于稳定,因此其成分较为均一,对应于晶体最外层的外缘的沉淀过程。而部分外缘内也含方解石包裹体并且富 Ba 则反映的断裂活动的再生。

4.3 储层白云石充填物与孔隙演化

两类白云石充填物的不同来源和生长方式对白云岩孔隙有不同的影响。菱形白云石与孔隙内的残余海水相关性较大,形成环境较为稳定密闭。由于缺乏物质的循环,使得成岩演化过程中的水岩反应程度较弱,空间相对局限。因而,菱形白云石的沉淀结果就是堵塞白云岩层孔隙,物性变差(图 3a),但后期的流体改造可能会对孔隙空间有所改善(图 4d)。相比之下,鞍状白云石的成岩物质来源于白云石的溶解,并且其形成过程受断裂控制。断裂活动使水岩反应有充足的流体来源。断裂活动产生的大量的裂隙,岩石变得脆弱,当热流体进入时,会溶蚀白云石^[35,36],

形成溶蚀孔洞和溶蚀扩大缝(图 7)。当温度压力下降到一定程度后白云石才会在裂隙内沉淀(图 3b,c,图 7)。由此可见,鞍状白云石沉淀不仅仅是堵塞孔隙的过程,同时它的存在也可能是热液溶蚀发生的标志。

5 结论

(1) 在塔里木盆地中央隆起区,下古生界白云岩储层中的白云石充填物从形态上可分为菱形白云石和鞍状白云石两类,它们具有不同的岩石学特征:菱形白云石内部结构简单,较为均一;鞍状白云石内部结构较为复杂,由内核、环带和外缘三部分组成。地球化学组成分析表明,菱形白云石形成于成岩作用的早期,成岩物质来源于残余的海水,其沉淀是一个相对稳定的过程,仅有部分后期富铁流体的掺入,从而形成了个别晶体的亮条纹。比较而言,鞍状白云石的形成则与断裂活动密切相关,其物质来源于热液运移过程中的白云石的溶解。鞍状白云石内部复杂的结构可能反映了断裂的幕式活动,在断裂活动初期,流体快速沉淀形成了鞍状白云石的内核,断裂活动高峰期,流体性质变化频繁,是晶体环带部分的生长期,而断裂活动后期,流体性质趋于稳定,形成了晶体的较为均一的外缘。

(2) 白云岩储层中的白云石充填物虽然在一定程度上减少了白云岩的储层孔隙度和渗透率,但同时应看到,根据本文分析结果,它们反映了一定的流体-岩石相互作用过程,对于研究储层成因机理具有重要意义。比如,在塔里木盆地中央隆起区,鞍状白云石的沉淀很可能是热液溶蚀作用发生的标志。因此,在白云岩储层研究中,今后需要进一步深入详细分析充填物的产状、充填作用发生的时间和机制,以便为优质储层预测提供更准确、更有价值的参考信息。本文提出白云岩储层中的两类白云石充填物,以期引起注意。

致谢 感谢编辑与审稿专家对本文初稿提出的有益建议,感谢南京大学曹剑副教授、张文兰高级工程师以及中国石油化工股份公司西北勘探公司各位专家等在完成本文过程中提供的帮助。

参考文献 (References)

- Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. Concepts and models of dehumidification [J]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogist (Special Publications), 1980, 28: 320

- 2 Sun S Q. Dolomite reservoirs porosity evolution and reservoir characteristics [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 186-204
- 3 Jones B. Petrography and significance of zoned dolomite cements from the Cayman formation (Miocene) of Cayman Brac, British West Indies [J]. Journal of Sedimentary Research, 2004, 74(1): 95-109
- 4 Jones B. Dolomite crystal architecture: genetic implications for the origin of the Tertiary dolostones of the Cayman Islands [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75: 177-189
- 5 Folk R L, Siedlecka A. The "schizohaline" environment: its sedimentary and diagenetic fabrics as exemplified by late Paleozoic rocks of Bear Island, Svalbard [J]. Sedimentary Geology, 1974, 11(1): 1-15
- 6 Duggan J P, Mountjoy E W, Stasiuk L D. Fault-controlled dolomitization at Swan Hills-Sinonette oil field (Devonian), deep basin west-central Alberta [J]. Canadian Sedimentology, 2001, 48(2): 301-323
- 7 Nader F H, Swennen R, Ellam R. Reflux-stratobound dolostone and hydrothermal volcanism-associated dolostone: a two-stage dolomitization model (Jurassic, Lebanon) [J]. Sedimentology, 2004, 51(2): 339-360
- 8 Gasparrini M, Bakker R J, Bechst dt T. Characterization of dolmitizing fluids in the Carboniferous of the Cantabrian Zone (NW Spain): a fluid-inclusion study with cryo-raman spectroscopy [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76: 1304-1322
- 9 Luczaj J A, Harrison III W B, Williams N S. Fractured hydrothermal dolomite reservoirs in the Devonian Dundee Formation of the central Michigan Basin [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1787-1801
- 10 Vandeginste R S, Sarah A G, Rob M. Development of secondary porosity in the Fairholme carbonate complex (southwest Alberta, Canada) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89: 394-397
- 11 叶德胜. 塔里木盆地北部丘里塔格群 (寒武系至奥陶系) 白云岩的成因 [J]. 沉积学报, 1992, 10(4): 77-86 [Ye Desheng. The origin of the Qulitage Group dolomite (Cambrian to Ordovician) in Northern Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(4): 77-86]
- 12 顾家裕. 塔里木盆地下奥陶统白云岩特征及成因 [J]. 新疆石油地质, 2000, 21(2): 120-122 [Gu Jiayu. Characteristics and origin analysis of dolomite in Lower Ordovician of Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(2): 120-122]
- 13 何莹, 鲍志东, 沈安江, 等. 塔里木盆地牙哈-英买力地区寒武系一下奥陶统白云岩形成机理 [J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 806-816 [He Ying, Bao Zhidong, Shen Anjiang, et al. The genetic mechanism of dolostones of the Cambrian-Lower Ordovician in Yahayingmaili Region, Tarim Basin: dolomitization through deep buried hydrothermal fluid [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 806-816]
- 14 钱一雄, 尤东华. 塔中地区西北部奥陶系白云岩 (化) 成因分析 [J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 146-150 [Qian Yixiong, You Donghua. An analysis of Ordovician dolomitization origin in Northwestern Tazhong Area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(3): 146-150]
- 15 孔金平, 刘效曾. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层空隙研究 [J]. 矿物岩石, 1998, 18(3): 25-33 [Kong Jinping, Liu Xi + aozeng. A study on the void in Ordovician carbonate reservoir, Tazhong Area, Tarim Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18(3): 25-33]
- 16 艾华国, 兰林英, 王筠, 等. 塔里木盆地雅克拉断凸前中生界不整合面之下下奥陶统白云岩储层特征 [J]. 地质学报, 1999, 73(4): 342-349 [Ai Huaguo, Lan Linying, Wang Jun, et al. The reservoir characteristics of Lower Ordovician dolomites below Pre-Mesozoic unconformity in Yakeka Fault-convex, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(4): 342-349]
- 17 库丽曼, 刘树根, 徐国强, 等. 和田古隆起区下古生界碳酸盐岩储层特征 [J]. 天然气工业, 2004, 24(6): 25-29 [Kulinan, Liu Shugen, Xu Guoqiang, et al. Lower Paleozoic carbonate reservoir characteristics of Hetian Paleoplift Area [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(6): 25-29]
- 18 王嗣敏, 金之钧, 解启来. 塔里木盆地塔中 45 井区碳酸盐岩储层的深部流体改造作用 [J]. 地质论评, 2004, 50(5): 543-547 [Wang Simin, Jin Zhijun, Xie Qilai. Transforming effect of deep fluids on carbonate reservoirs in the Well TZ45 Region [J]. Geological Review, 2004, 50(5): 543-547]
- 19 郑和荣, 吴茂炳, 邬兴威, 等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层油气勘探前景 [J]. 石油学报, 2007, 28(2): 1-8 [Zheng Herong, Wu Maobing, Wu Xingwei, et al. Oil-gas exploration prospect of dolomite reservoir in the Lower Paleozoic of Tarim Basin [J]. Acta Petroleologica Sinica, 2007, 28(2): 1-8]
- 20 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响 [J]. 地质学报, 2006, 80(2): 245-253 [Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 245-253]
- 21 吕修祥, 解启来, 杨宁, 等. 塔里木盆地深部流体改造型碳酸盐岩油气聚集 [J]. 科学通报, 2007, 52(增刊): 142-148 [Lv Xixiang, Xie Qilai, Yang Ning, et al. The petroleum accumulation of carbonate altered by deep fluid in Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(suppl): 142-148]
- 22 何治亮, 毛洪斌, 周晓芬, 等. 塔里木多旋回盆地与复式油气系统 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 207-213 [He Zhiliang, Mao Hongbin, Zhou Xiaofen, et al. Complex petroleum system and multicycle Basin in Tarim [J]. Oil and Gas Geology, 2000, 21(3): 207-213]
- 23 汤良杰. 塔里木显生宙盆地演化主要阶段 [J]. 地学前缘, 1997, 4(3-4): 318-324 [Tang Liangjie. Major evolutionary stages of Tarim Basin in Phanerozoic Time [J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3-4): 318-324]
- 24 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 塔里木盆地地质热事件研究 [J]. 科学通报, 1997, 1096-1098 [Chen Hanlin, Yang Shufeng, Dong Chuanwan, et al. Study on geothermal events of Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 1096-1098]
- 25 张臣, 郑多明, 李江海, 柯坪断隆古生代的构造属性及其演化特征 [J]. 石油天然气地质, 2001, 22(4): 314-318 [Zhang Chen, Zheng Duoming, Li Jianghai. Attribute of Paleozoic structures and its

- evolution characteristics in Keping Fault-Uplift [J]. *Oil and Gas Geology*, 2001, 22(4): 314-318]
- 26 Gregg JM, Sibley D F. Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1984, 54: 908-931
- 27 Shukla V. Epigenetic dolomitization and origin of xenotopic dolomite texture-discussion [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1986, 56: 733-736
- 28 Kimaci M Z. Lithofacies features and evolution of the Late Jurassic carbonate platform, Uluçayur area (Bayburt-eastern Pontides) [J]. *Geological Bulletin of Turkey*, 2000, 43(2): 33-47
- 29 曹剑, 胡文瑄, 姚素平, 等. 准噶尔盆地石炭-二叠系方解石脉的碳、氧、锶同位素组成与含油气流体运移 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(5): 722-799 [Cao Jian, Hu Wenxuan, Yao Suping, *et al*. Carbon, oxygen and strontium isotope composition of calcite veins in the Carboniferous to Permian source sequences of the Junggar Basin: implications on petroleum fluid migration [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(5): 722-799]
- 30 Wamen J. Dolomite occurrence, evolution and economically important association [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1-3): 1-81
- 31 Machell H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004, 235: 7-63
- 32 Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690
- 33 Leach D L, Plumlee G S, Hofstra A H, *et al*. Origin of late dolomite cement by CO₂-saturated deep basin brines: evidence from the Ozark region, central United States [J]. *Geology*, 1991, 19(4): 348-351
- 34 Chan M Y, Gregg JM, Shelton K L. Dolomitization and Dolomite Neomorphism: Trenton and Black River Limestones (Middle Ordovician) Northern Indiana, USA [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(1): 265-274
- 35 Wallace C A, Spencer R J, Henderson C M, *et al*. The Lower Permian Mount Bayley Formation, Canadian Arctic: an example of a deep subaqueous evaporate [J]. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 1994, 17: 731-742
- 36 Boni M, Parente G, Bechstaedt T, *et al*. Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy): evidence for a widespread Late-Variscan fluid flow event (in paleofluid flow and diagenesis during basin evolution) [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 131: 181-200

Feature and Origin of Dolomite Filling in the Upper Cambrian-Lower Ordovician Dolostone of the Central Uplift, Tarim Basin

ZHANG Jun-tao¹ HU Wen-xuan¹ QIAN Yi-xiong² WANG Xiao-lin¹
ZHU Jing-quan³ ZHANG Hong-an² SU Juan² WU Shi-qiang³

(1. Department of Earth Science, State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093;

2 Northwest E&P Company, SINOPEC, Urumqi 830011; 3 China Academy of Sciences, Institute of Geology and Geophysics, Beijing 100029)

Abstract Two genetically distinct dolomite fillings are recognized in Lower Paleozoic dolostone in the Upper Cambrian-Lower Ordovician dolostone of the Central uplift, Tarim basin: rhombus and saddle dolomite fillings, which occur in different diagenetic considerations and have different character. The former crystal exhibits homogeneous, the later crystal is composed of three distinct parts that are rim, cleft lumen and core. Stratigraphic, petrographic and geochemical data suggest, rhombus dolomite filling deposited steadily and source of Mg²⁺ is from the altered seawater. However, material source of saddle dolomite filling is hydrothermal dissolution of dolomite. The formation of saddle dolomite filling, three parts of which formed in different phase, is associated with faulting. The deposition of dolomite filling is porosity decreasing, but saddle dolomite is a sign of dissolution.

Key words saddle dolomite, rhombus dolomite, Upper Cambrian-Lower Ordovician, central uplift, Tarim Basin