

文章编号: 1000-0550(2010) 02-0209-10

塔里木盆地塔中地区上寒武统三种截面特征白云岩的 岩石地球化学特征与成因研究¹

陈永权 周新源 杨海军

(中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院 新疆库车 841000)

摘要 塔里木盆地寒武系白云岩分布范围广,厚度大,是非常重要的油气储层。研究以塔中地区上寒武统白云岩为对象,试图通过岩石学与地球化学分析方法探讨白云岩的成因问题。塔中地区上寒武统白云岩可划分为雾心亮边型自形粒状细晶白云岩、洁净明亮型自形粒状粗晶白云岩、截面污浊型自形(他形)粒状白云岩;岩石学分析表明,雾心亮边型白云岩可能为两世代交代产物,洁净明亮与截面污浊型白云岩为单世代交代产物。雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩的 Mg/Ca 摩尔比变化在 0.76~0.93 之间,截面污浊型他形粒状白云岩 Mg/Ca 比平均值最高,指示其演化程度较高;雾心亮边型白云岩与洁净明亮型白云岩皆表现出核部富 Mg 边部富 Ca 特征,指示亮边部分云化流体中大气水的含量更高。雾心亮边型白云岩、截面污浊型自形粒状白云岩与截面污浊型他形粒状白云岩平均有序度值分别为 0.51、0.6、0.69,指示了雾心亮边型白云岩交代速度较快,截面污浊型他形粒状白云岩由于受到了热作用导致其具有较高的有序度与演化程度。雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩富集 Rb、Th、Ti 等元素,稀土元素配分模式呈平缓右倾特征,体现了蒸发海水特征;雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化为 $-2.5\text{‰} \sim -1.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化为 $-8.3\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$, 指示了白云岩形成于低温环境,交代流体为蒸发海水,同时雾心亮边型白云岩低 $\delta^{18}\text{O}$ 特征反映了大气水的参与;雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化在 0.708 835~0.709 204 与古海水一致。因此,雾心亮边型白云岩为两世代交代产物,第一世代交代雾心,交代流体以蒸发海水为主,第二世代为亮边,交代流体以海水与大气水混合为主;洁净明亮型白云岩为由海水与大气淡水组成的混合水云化的产物,只是核部交代期混合中海水比例高,边部交代期混合水中大气水混合比例高;截面污浊型则由蒸发海水交代形成,他形粒状结构白云岩为自形粒状白云岩经热改造而成,导致了其具有较高的有序度与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。

关键词 塔里木盆地 寒武系 白云岩 截面特征 地球化学

第一作者简介 陈永权 男 1978 年出生 博士 石油地质 E-mail: chen Yongquan-th@petrochina.com.cn

中图分类号 P588.24⁺.5 **文献标识码** A

0 前言

据统计,北美洲白云岩储层的油气储量占碳酸盐油气储量的 80% 以上,且白云岩油气储量占全球碳酸盐油气储量的 50% 以上^[1]。在欧洲的西北部与南部、北非、中东等地白云岩油气储层也占有非常重要的比例^[2-3]。塔里木盆地寒武系白云岩分布广,厚度大,在这些白云岩地层中已经发现了具工业价值的油气藏。随着塔里木盆地岩溶型油气藏的日益开发,白云岩型油气藏已被视为新领域勘探的重点目标^[4-5]。然而由于塔里木盆地白云岩成因研究基础薄弱,制约了白云岩储层的识别与预测,束缚了白云岩型油气藏的勘探。

白云岩的成因是储层研究的基础,是推测储层空

间展布的一个重要地质依据,但是到目前为止,白云岩的成因问题仍然是一个科学难题^[6-8]。本文以塔中地区上寒武统白云岩为研究对象,试图通过岩石学与地球化学方法探讨塔里木盆地塔中地区上寒武统白云岩的成因问题。

1 区域地质概况

塔里木盆地夹持于天山、昆仑山和阿尔金山之间,盆地中心为塔克拉玛干沙漠,周缘为一系列大型山前冲(洪)积扇和洪积平原。塔里木盆地可划分为 7 个构造单元(三个隆起与四个拗陷):塔北隆起、中央隆起、塔南隆起、库车拗陷、北部拗陷、西南拗陷、东南拗陷^[9]。塔里木盆地寒武系沉积岩分布范围广,厚度较大;岩性主要受沉积相的控制。盆地上寒武统

¹ 中国石油塔里木油田分公司 2006 年度博士后科研项目资助。

收稿日期: 2008-12-22 收修改稿日期: 2009-03-27

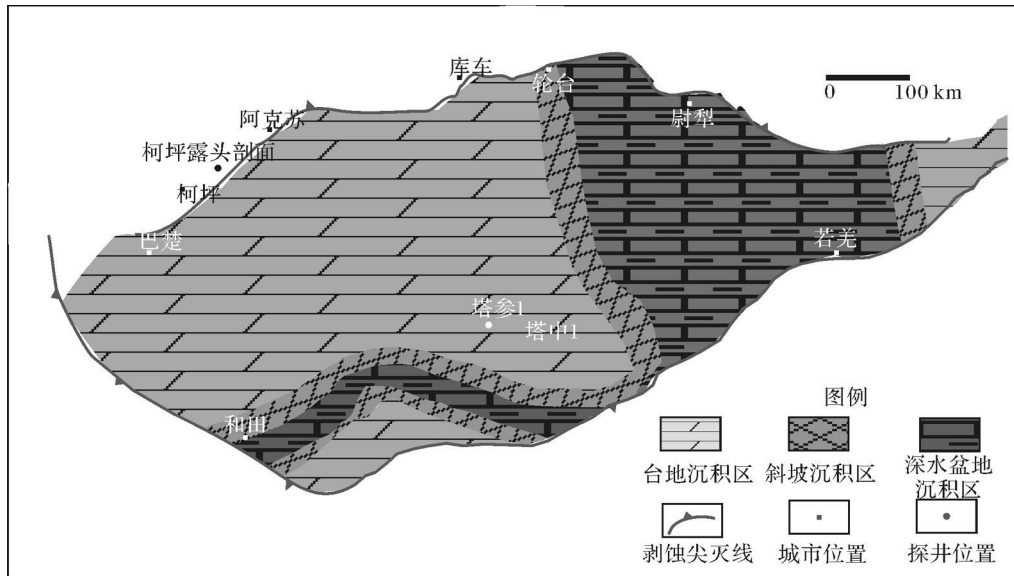


图 1 塔里木盆地区上寒武统沉积相与研究探井井位图

Fig 1 The sketch map of the localities of studied wells and sedimentary facies of the upper Cambrian, Tarim Basin

可划分为两个相区,盆地东部为深水盆地相区,盆地西部为克拉通台地相沉积区,以轮南—古城斜坡为界(图 1)。盆地东部深水盆地地区上寒武统沉积主要以泥晶灰岩为主;盆地西部台地区上寒武统沉积主要以白云岩为主。

塔中 1 井与塔参 1 井位于塔里木盆地的塔中地区(图 1),同时位于上寒武统台地相沉积区,这两口探井上寒武统下丘里塔格组沉积的主要岩性为白云岩,埋藏深度皆在 5 000 m 以下。

2 塔中地区上寒武统白云岩的截面特征与岩石学特征

根据显微镜下矿物的截面特征,塔中地区上寒武统白云岩主要分为 3 种类型:雾心亮边型、洁净明亮型、与截面污浊型。“雾心亮边”特征作为显微镜下白云石的截面特征已有较多报导^[10-11],本文提出“洁净明亮”与“截面污浊”两种矿物截面特征作为对比。洁净明亮型白云岩以矿物截面洁白明亮为主要标志,概念上与邵龙义^[10]描述的“含明亮白云岩晶体及钙质残余的钙质白云岩”相似;截面污浊型白云岩则以矿物截面较污浊为特征。

2.1 雾心亮边型细晶白云岩

雾心亮边型细晶白云岩为塔中地区上寒武统白云岩的主要类型,在塔中 1 井与塔参 1 井钻遇的上寒武统普遍存在。显微镜下雾心亮边型细晶白云石表现为雾心亮边结构,砂屑白云石颗粒间亮晶白云石胶

结,部分呈栉壳状或马牙状(图 2a)。根据岩石学特征,雾心亮边型细晶白云岩是由两个世代的白云岩化作用产物,雾心为早期白云岩化的产物,形成于早期固结成岩阶段;亮边是第二世代白云岩化的结果,其洁净明亮特征指示其云化流体中可能有大气淡水的加入^[12]。

2.2 洁净明亮型粗晶白云岩

洁净明亮型粗晶白云岩主要见于塔中 1 井。岩芯呈花斑状,坍塌角砾状构造,指示该岩性段岩溶较发育;显微镜下可见白云石洁净明亮、粗晶结构(图 2b)。溶洞壁(原岩)由雾心亮边型白云岩组成。该矿物分布关系表明,洁净明亮型粗—巨晶白云岩形成时间晚于雾心亮边型细晶白云岩,同时或晚于大气水岩溶期。其洁净明亮特征类似于雾心亮边型白云岩的亮边白云石,可能形成于大气水成岩作用晚期阶段的交代充填作用^[13]。

2.3 截面污浊型中晶白云岩

截面污浊型中晶白云岩是塔参 1 井上寒武统中普遍存在的一种白云岩类型。依据白云岩的晶形,截面污浊型中粗晶白云岩可分为截面污浊型他形粒状白云岩(图 2c)与截面污浊型自形粒状白云岩(图 2d)。该白云岩概念上与胡忠贵等^[13]报导的“中成岩期埋藏白云岩”相似。由于该白云岩晶体较粗,同时截面污浊,推测该白云岩形成于埋藏岩溶空间中;自形粒状结构白云岩形成于低温流体环境,他形粒状

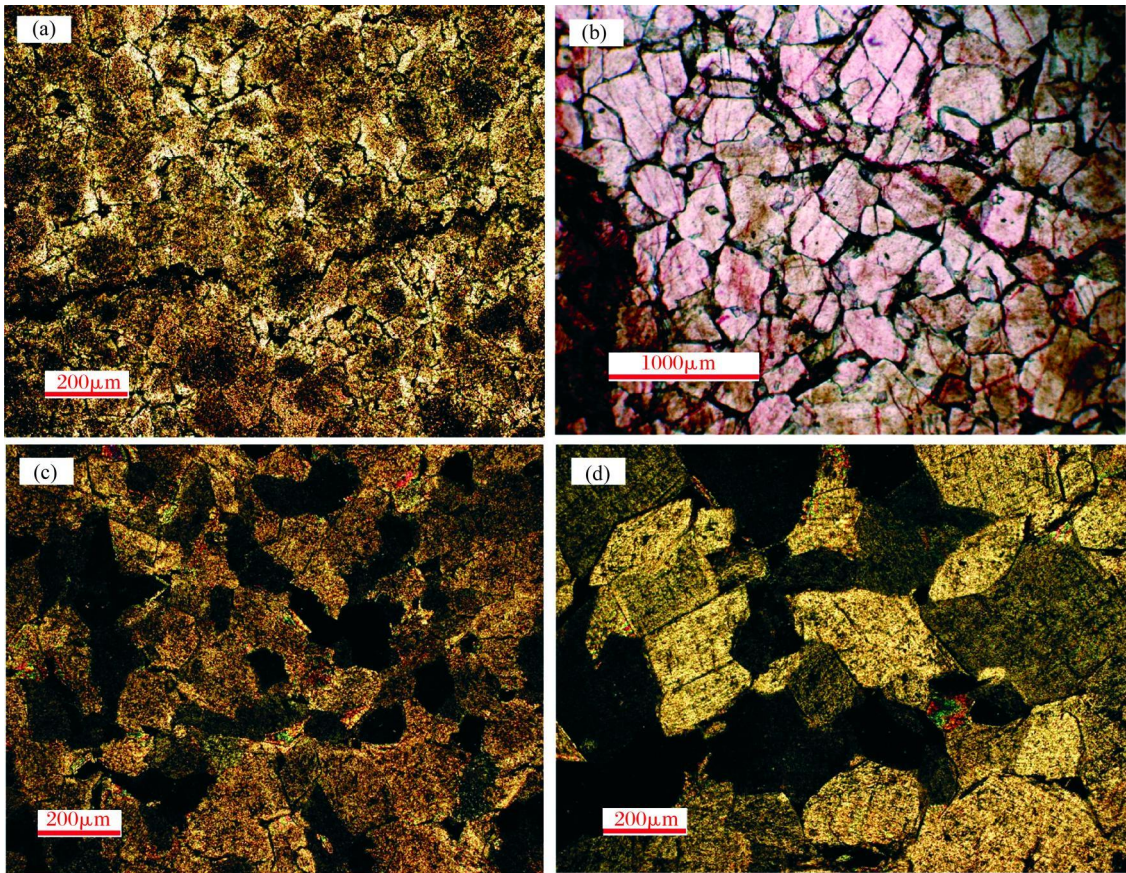


图 2 塔中地区上寒武统不同截面特征的白云岩类型

Fig 2 The microscopic photos of each dolomites with different section each other, the Upper Cambrian, Tazhong area
 (a): 雾心亮边型细晶白云岩, 塔参 1 井, 5 104 22m, 单偏光; (b): 洁净明亮型粗晶白云岩, 塔中 1 井, 5 076 78m, 单偏光; (c): 截面污浊型他形粒状白云岩, 塔参 1 井, 5 112 75m, 正交光; (d): 截面污浊型自形粒状白云岩, 塔参 1 井, 5 579 1m, 正交光

结构白云岩可能形成于高温环境, 也可能由低温环境的白云岩经热改造作用形成。

3 地球化学分析方法与结果

3.1 分析方法

3.1.1 元素含量分析方法和样品有序度分析

白云岩全岩样品的主量元素含量分析使用南京大学现代分析中心的 XRF 仪器完成, 分析精度高于 0.5%。全岩微量和稀土元素含量分析在南京大学国家重点实验室完成, 使用仪器为 Finnigan MAT Element ④型高精度电感耦合等离子质谱仪 (HR-ICPMS), 分析精度高于 5%。

白云岩的有序度在南京大学国家重点实验室的 Bede-D1 型 X 射线衍射仪上分析完成。

3.1.2 全岩样品 C、O 同位素分析

白云岩样品的全岩 C、O 同位素分析测试在南京大学内生金属成矿作用研究国家重点实验室完成。

仪器采用 Finnigan MAT Delta XP 型连续流质谱仪, 自动进样器装置中以 100% 磷酸与白云岩样品粉末在 70°C 条件下反应 2 h 生成的 CO₂ 气体直接进同位素质谱仪进行测试碳、氧同位素组成。

3.1.3 Sr 同位素分析方法

白云岩样品粉末用 1N HCl 室温下溶解, 溶解后离心分离, 取上层清液经离子交换树脂对 Sr 元素进行分离纯化, 具体分离流程可见濮巍等^[14]文章。最后分离纯化好的样品使用南京大学的 Finnigan Triton TI 型表面热电离质谱仪 (TMS) 进行 Sr 同位素比值的测定。采用的标样为美国国家标准局的 NBS-987Sr 标准溶液, 本次研究中该标样的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 测试值为 0.710 260 ± 8 (n = 10)。

3.2 分析结果

雾心亮边型白云岩、截面污浊型白云岩全岩常量元素、同位素、与有序度分析结果见表 1; 雾心亮边型白云岩、洁净明亮型白云岩电子探针主量元素分析见

表 2 雾心亮边型白云岩、截面污浊型白云岩全岩微量稀土元素分析结果见表 3 与表 4

表 1 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩常量元素、同位素与有序度分析结果

Table 1 The bulk results of major elements, isotope and order degree for the "C body center with bright rim" type of euhedral dolomite (CBED) and "dirty section" type of euhedral/subhedral dolomite (DED or DSD)

样品号	井段 /m	岩性	$^{13}\text{C}/\text{‰}$	$^{18}\text{O}/\text{‰}$	有序度	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	SO_3	SiO_2	L. O. I	SUM
TC 1-24	5073.8		-1.6	-6.9	0.59	0.708977±5	1.11	30.45	18.92	0.57	0.56	0.03	0.79	3.48	44.61	100.52
TC 1-26	5076.5	雾心亮边	-1.4	-7.5	0.47	-	0.92	30.39	19.20	0.32	0.52	0.03	1.08	4.20	43.60	100.26
TC 1-31	5083.0	型细晶白	-1.6	-7.1	0.51	0.708923±4	0.80	30.79	19.53	0.28	0.49	0.05	0.30	3.46	44.65	100.34
TC 1-33	5085.6	云岩	-1.9	-6.8	0.55	-	0.86	30.71	18.94	0.33	0.49	0.05	0.48	3.27	44.84	99.96
TC 1-39	5093.4		-2.0	-7.1	0.60	0.708863±8	0.20	32.36	20.06	0.15	0.10	0.05	0.33	1.77	45.46	100.47
TC 1-47	5104.2		-1.8	-6.7	0.44	-	0.27	32.31	18.94	0.19	0.12	0.02	0.12	3.18	44.79	99.94
TC 1-48	5106.4		-1.7	-8.3	0.49	0.708835±3	0.24	31.50	19.88	0.17	0.11	0.02	0.12	2.62	45.14	99.81
TC 1-52	5110.6		-2.2	-6.8	0.42	0.708869±4	0.13	34.78	18.79	0.10	0.07	0.03	0.22	0.86	44.85	99.84
TC 1-64	5349.0	截面污浊	-2.4	-6.7	0.61	-	0.14	32.30	20.53	0.11	0.05	0.02	0.11	0.52	45.99	99.79
TC 1-67	5351.1	型自形中	-	-	0.56	0.708938±3	0.15	32.36	20.83	0.12	0.06	0.03	0.12	0.48	46.00	100.14
TC 1-68	5352.0	晶白云岩	-	-	0.57	-	0.15	32.38	20.57	0.10	0.06	0.03	0.09	0.55	45.92	99.83
TC 1-69	5352.5		-2.5	-6.6	-	0.708987±2	0.16	32.09	20.87	0.13	0.05	0.03	0.15	0.69	45.60	99.75
TC 1-72	5579.1		-1.4	-5.9	0.58	-	0.71	30.84	20.23	0.25	0.29	0.04	0.25	2.35	45.60	100.56
TC 1-73	5579.5		-1.5	-5.9	0.66	-	0.38	31.84	20.61	0.28	0.09	0.03	0.24	0.52	46.19	100.17
TC 1-78	5584.4		-0.1	-6.7	-	-	0.27	32.06	20.36	0.13	0.06	0.08	0.12	0.70	46.61	100.38
TC 1-90	6416.7	截面污浊	-1.0	-5.4	0.58	0.709204±4	0.20	29.57	19.87	0.18	0.07	0.12	0.22	4.51	45.29	100.03
TC 1-91	6417.0	型他形中	-1.0	-5.9	0.76	-	0.29	29.86	19.81	0.15	0.10	0.05	0.23	4.04	45.49	100.03
TC 1-94	6419.5	晶白云岩	-1.2	-5.9	0.74	0.709124±4	0.50	28.72	19.15	0.33	0.22	0.11	0.74	5.42	44.89	100.08

注: 常量元素含量单位: %

表 2 雾心亮边型白云岩与洁净明亮型白云岩电子探针微区分析结果

Table 2 The microprobe analytical results for "C body center with bright rim" type of euhedral dolomite (CBED), "clean and light" type of euhedral dolomite (CLEED)

样品号	岩性	颗粒	位置	$\text{K}_2\text{O}/\text{‰}$	F/%	CaO/%	MgO/%	$\text{Na}_2\text{O}/\text{‰}$	BaO/%	$\text{SO}_2/\text{‰}$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{‰}$	FeO/%	Mg/Ca
塔参 1 井 5093.41m	雾心亮边型 细晶白云岩	1	雾心	-	0.135	31.775	22.340	0.148	0.070	0.020	0.018	0.038	0.990
			亮边	-	0.020	37.900	17.850	0.010	0.070	-	-	0.040	0.660
		2	雾心	-	-	31.340	21.100	0.020	0.015	0.265	0.080	0.040	0.940
			亮边	0.002	0.095	33.355	20.426	0.003	0.007	0.012	0.017	0.022	0.855
		3	雾心	0.015	-	33.825	22.798	0.148	-	0.028	0.038	0.011	0.945
			亮边	0.007	0.094	32.076	21.726	0.063	0.035	0.021	0.016	0.038	0.947
		4	雾心	0.008	0.037	32.404	23.335	0.017	0.060	-	0.018	0.028	1.010
			亮边	-	0.056	33.166	21.780	0.010	0.062	0.003	0.046	0.039	0.920
		5	雾心	0.007	0.056	30.321	20.789	0.045	0.008	0.014	0.009	0.011	0.960
			亮边	-	0.112	31.201	20.840	0.204	0.049	0.021	0.021	0.008	0.935
		6	雾心	-	0.075	31.157	22.180	0.049	0.034	-	0.013	0.002	1.000
			亮边	0.005	0.066	32.080	20.969	0.204	0.036	0.063	0.029	0.008	0.917
塔中 1 井 5074.65m	洁净明亮型 粗晶白云岩	1	核部	0.002	-	28.834	20.438	0.037	0.002	0.017	-	0.003	0.992
			边部	-	0.194	35.169	17.451	0.007	-	0.006	-	-	0.695
		2	核部	0.004	0.019	33.015	20.781	0.01	-	0.013	0.021	-	0.881
			边部	-	0.173	35.549	19.011	0.002	0.03	0.008	0.027	0.019	0.749
		3	核部	-	-	32.465	19.356	0.002	-	0.017	0.014	-	0.835
			边部	-	-	35.256	20.043	0.014	-	-	-	0.01	0.796
		4	核部	-	0.019	28.686	20.692	0.026	0.048	0.014	-	0.045	1.01
			边部	-	0.038	31.996	20.79	-	0.014	0.02	0.031	0.009	0.91
		5	核部	0.008	-	29.06	22.261	-	-	0.018	0.011	-	1.072
			边部	0.01	0.019	33.434	19.573	0.01	0.034	0.009	-	0.018	0.82
		6	核部	0.004	0.056	30.607	21.583	0.002	0.057	0.018	0.021	0.01	0.987
			边部	-	0.076	33.485	20.386	0.024	-	0.015	0.007	0.001	0.852
		7	核部	-	0.092	28.406	21.949	0.02	0.039	0.021	0.056	0.007	1.082
			边部	-	0.095	34.289	20.821	0.02	0.05	0.032	-	-	0.85

表 3 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩微量元素分析结果

Table 3 The bulk trace elements results for CBED and DED/DSD

样品号	井段 /m	岩性	Rb	Ba	Th	U	Mo	V	Nb	Mn	Sr	Y
TC I-24	5073 8	雾心亮边型白云岩	1.09	8.08	0.71	1.11	1.45	12.01	0.02	84.75	96.31	1.11
TC I-26	5076 5		0.34	8.89	0.55	0.24	0.62	7.35	0.00	34.19	114.15	0.84
TC I-31	5083 0		0.31	71.88	0.38	0.20	1.35	5.91	0.00	44.12	93.67	0.79
TC I-33	5085 6		0.29	49.02	0.39	0.26	0.42	4.03	0.00	59.39	100.94	1.09
TC I-39	5093 4		0.53	4.19	0.22	0.93	1.59	5.98	0.02	47.03	117.80	0.70
TC I-47	5104 2		0.23	9.55	0.37	0.28	0.31	2.39	0.00	35.41	145.06	0.97
TC I-48	5106 4		0.16	7.60	0.16	0.23	1.22	4.50	0.00	34.24	75.76	0.54
TC I-52	5110 6		0.14	9.02	0.10	0.49	0.41	3.91	0.00	59.50	168.16	0.56
TC I-64	5349 0		0.04	8.99	0.11	0.69	0.75	1.84	0.00	25.43	74.94	0.29
TC I-67	5351 1	0.08	12.82	0.07	0.17	0.57	3.74	0.00	36.25	75.99	0.34	
TC I-68	5352 0	0.09	42.82	0.13	0.35	0.37	2.36	0.00	28.42	59.52	0.39	
TC I-69	5352 5	截面污浊型自形中晶白云岩	0.08	24.22	0.11	0.37	1.25	1.53	0.01	30.33	92.03	0.28
TC I-72	5579 1		0.45	16.35	0.36	0.81	3.93	2.35	0.00	30.11	70.70	1.11
TC I-73	5579 5		0.31	3.08	0.21	0.69	1.45	2.10	0.00	27.72	70.79	1.05
TC I-78	5584 4		0.20	1.94	0.16	0.17	0.26	0.51	0.00	39.83	85.90	0.33
TC I-90	6416 7		0.19	255.73	0.14	0.21	0.58	2.21	0.00	57.90	53.32	0.45
TC I-91	6417 0	截面污浊型他形中晶白云岩	0.12	2.30	0.15	0.35	4.25	2.16	0.00	40.87	69.00	0.49
TC I-94	6419 5		0.45	15.99	0.37	0.75	1.98	5.65	0.01	54.34	84.23	0.66

注: 微量稀土元素含量单位: $\times 10^{-6}$

表 4 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩稀土元素分析结果

Table 4 The bulk rare earth elements results for CBED and DED/DSD

样品号	井段 /m	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	
TC I-24	5073 8	雾心亮边型白云岩	1.52	3.85	0.46	1.30	0.24	0.05	0.17	0.03	0.16	0.04	0.091	0.019	0.101	0.016	8.06	
TC I-26	5076 5		1.20	2.18	0.35	0.96	0.17	0.03	0.13	0.02	0.16	0.03	0.096	0.013	0.076	0.010	5.44	
TC I-31	5083 0		1.26	2.37	0.36	0.99	0.18	0.03	0.13	0.02	0.15	0.03	0.085	0.010	0.065	0.009	5.69	
TC I-33	5085 6		1.94	3.56	0.51	1.39	0.25	0.05	0.18	0.03	0.19	0.04	0.108	0.014	0.082	0.011	8.36	
TC I-39	5093 4		0.93	2.17	0.24	0.75	0.13	0.02	0.10	0.02	0.09	0.02	0.051	0.009	0.052	0.008	4.59	
TC I-47	5104 2		1.64	3.21	0.44	1.22	0.23	0.04	0.16	0.03	0.18	0.04	0.102	0.012	0.087	0.012	7.40	
TC I-48	5106 4		0.83	1.53	0.23	0.61	0.12	0.02	0.09	0.01	0.09	0.02	0.050	0.006	0.038	0.006	3.63	
TC I-52	5110 6		0.93	1.69	0.22	0.63	0.11	0.02	0.09	0.01	0.09	0.02	0.052	0.006	0.040	0.005	3.91	
TC I-64	5349 0		0.51	0.92	0.12	0.35	0.06	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.029	0.003	0.019	0.002	2.14	
TC I-67	5351 1	0.59	1.07	0.14	0.40	0.08	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.033	0.004	0.021	0.003	2.48		
TC I-68	5352 0	截面污浊型自形中晶白云岩	0.67	1.23	0.16	0.43	0.09	0.01	0.06	0.01	0.07	0.01	0.039	0.005	0.030	0.004	2.83	
TC I-69	5352 5		0.49	0.94	0.13	0.34	0.06	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.028	0.003	0.021	0.003	2.14	
TC I-72	5579 1		2.00	3.78	0.51	1.43	0.24	0.04	0.17	0.03	0.19	0.04	0.109	0.015	0.084	0.013	8.65	
TC I-73	5579 5		1.91	3.46	0.46	1.27	0.22	0.04	0.17	0.03	0.17	0.04	0.108	0.014	0.096	0.013	8.00	
TC I-78	5584 4		0.62	1.19	0.17	0.43	0.07	0.01	0.06	0.01	0.06	0.01	0.036	0.004	0.030	0.004	2.71	
TC I-90	6416 7		截面污浊型他	0.72	1.39	0.20	0.54	0.11	0.03	0.08	0.01	0.08	0.02	0.045	0.006	0.038	0.005	3.26
TC I-91	6417 0		形中晶白云岩	0.81	1.50	0.21	0.60	0.12	0.02	0.08	0.01	0.08	0.02	0.050	0.007	0.037	0.005	3.56
TC I-94	6419 5			0.87	2.17	0.27	0.77	0.15	0.03	0.11	0.02	0.10	0.03	0.055	0.011	0.066	0.010	4.65

注: 微量稀土元素含量单位: $\times 10^{-6}$

分析结果表明, 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩 MgO 含量变化在 18.79% ~ 20.87% 之间, CaO 含量变化在 28.72% ~ 34.78% 之间; 雾心亮边型白云岩 SO₂% 含量较高(平均值 2.86%), 截面污浊型他形粒状白云岩 SO₂% 含量(平均值 4.66%) 远高于截面污浊型自形粒状白云岩(平均值 0.83%)。

雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩富集 Rb、Th、Ti 等元素, 该两种白云岩贫稀土元素, Σ REE 变化在 $2.14 \times 10^{-6} \sim 8.36 \times 10^{-6}$ 之间, δ Ce 略显负异常, δ Eu 异常不明显。

全岩 C-O 同位素分析结果表明, 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩的 $\delta^{13}C$ 值变化为 -2.5‰。

~ - 1.0‰, δ¹⁸O 值变化为 - 8.3‰ ~ - 5.4‰, ⁸⁷Sr/⁸⁶S 比值变化在 0.708 835~ 0.709 204.

对雾心亮边白云石与洁净明亮白云石的电子探针微区分析结果表明, 雾心亮边白云石的雾心部分比亮边部分富 Mg 贫 Ca, Mg/Ca 比值从核部向边部降低; 雾心部分 Na₂O 平均值为 0.088%, 亮边 Na₂O 平均值为 0.058%. 同样的结果显示在洁净明亮型白云石常量元素微区分析中, 核部富 Mg, 边部富 Ca, Mg/Ca 比值从核部向边部降低; Na₂O 含量一般为核部较高.

4 讨论

4.1 常量元素

4.1.1 全岩常量元素

理论上, 无杂质的潮坪蒸发沉积白云岩接近于化学计量组成^[3]; 交代白云岩与沉积白云岩不同, 交代白云岩中 Mg 离子是以 Ca 离子的替代者形式进入晶格, 因此随着灰岩交代比例的增加, 岩石中 MgO 含量升高, CaO 含量降低. 在 CaO—MgO% 图解中, 沉积白云岩落在沉积点附近 (CaO = 30.4%, MgO = 21.7%), 交代白云岩 CaO 与 MgO 含量间呈线性负相关关系. 在 MgO%—Mg/Ca 图解中, 沉积白云岩落在沉积点附近 (MgO = 21.7%, Mg/Ca = 1), 交代白云岩 MgO 含量与 Mg/Ca 比值之间呈非线性正相关关系. 在两个图解中, 沿着交代线向沉积点方向交代白云岩交代程度更高, 白云岩有序度将更高.

当具有其他非 Ca, Mg 物质混染时, 岩石中的 CaO 与 MgO 含量将同时降低, 但是 Mg/Ca 比值保持恒定, 因此在 CaO%—MgO% 图解与 MgO%—Mg/Ca 图解中, 白云岩数据点将都偏离沉积点与交代线. 沉

积白云岩数据点将落在“沉积白云岩非 Ca, Mg 杂质混染区”中; 交代白云岩数据点将落在“交代白云岩非 Ca, Mg 杂质混染区”中 (图 3).

本研究中的雾心亮边型自形粒状白云岩与截面污浊型 (自形粒状、他形粒状) 白云岩数据点皆落在了交代线及“交代白云岩非 Ca, Mg 杂质混染区”中 (图 3), 指示了该两种特征的白云岩皆为交代成因. 雾心亮边型白云岩与截面污浊型他形粒状白云岩数据点偏离了交代线, 同时该两种白云岩 SO₂ 含量 (平均值 3.35%) 明显高于截面污浊型自形粒状白云岩 (平均值 0.83%), 表明硅化作用产生的硅质成分是导致雾心亮边型白云岩与截面污浊型他形粒状白云岩数据点偏离交代线的主要原因.

4.1.2 微区常量元素

雾心亮边型白云岩与洁净明亮型白云岩的微区元素含量分析结果表明, 雾心亮边型细晶白云岩的核部 Mg/Ca 比值高于边部; 尽管洁净明亮型白云岩没有雾心, 但其核部 Mg/Ca 比值依然高于边部 (图 4); Na₂O 平均含量上, 雾心亮边型白云石与洁净明亮型白云石皆表现出“核高边低”的特征.

地质流体中, 海水具有较高的 Mg/Ca 比值, 现代海水 Mg/Ca 摩尔比为 5.3 而陆表淡水河流中 Mg/Ca 比值较低 (现代河流为 0.44)^[15]. 因此, 雾心亮边型白云石与洁净明亮型白云岩 Mg/Ca 比值“核高边低”特征, 可能与海水与淡水的混合作用有关.

另一方面 Na₂O 含量是体现交代卤水盐度的最直接反映, 交代卤水为海水时, Na₂O 含量高, 反之交代流体为大气淡水时, Na₂O 含量低. 本研究中, Na₂O 含量上的“核高边低”特征, 指示了亮边云化过程中的流体盐度更低, 可能为大气水参与的结果.

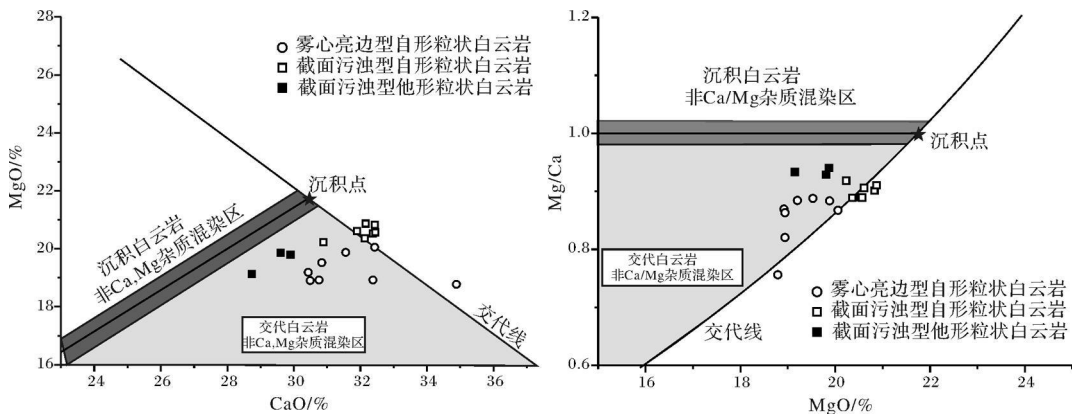


图 3 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩 CaO%—MgO% 图解与 MgO%—Mg/Ca 图解

Fig 3 The relationship of CaO%—MgO% and MgO%—Mg/Ca for CBED and DED/DS

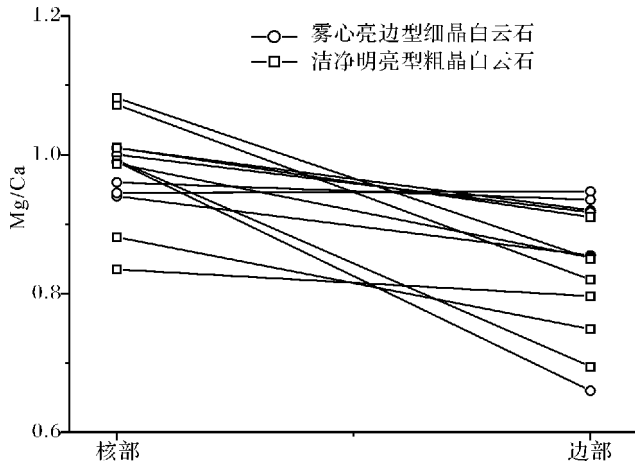


图 4 雾心亮边型白云石与洁净明亮型白云石核心与边部 Mg/Ca 比值特征

Fig 4 The Mg/Ca variations from core to rim for CBED and CLED

根据岩石学分析, 雾心亮边型白云岩交代过程分为两个阶段, 雾心阶段与亮边阶段, 因此雾心阶段云化流体可能为蒸发海水, 亮边阶段云化流体可能为海水与大气水的混合; 洁净明亮型白云石 Mg/Ca 比值、Na₂O 含量的“核高边低”特征, 可能指示了洁净明亮型白云石由海水与淡水的混合水云化造成, 并且从核部向边部云化混合水中大气淡水成分逐渐增多。

4.2 有序度

白云岩的有序度是衡量白云岩结晶速度、结晶温度与演化程度的一个非常重要的指标^[9, 16]。白云岩的有序度与结晶速度有关, 结晶速度越慢, 白云岩有序度越高, 反之, 有序度越低^[17], 因此潮坪蒸发沉积白云岩具有较低的有序度值^[9, 16, 18]; 刘永福^[19]报导了塔里木盆地塔东地区热液白云岩具有较高的有序度值, 因此高的结晶温度可能是导致白云岩有序度较高的主要原因; 埋藏条件下, 白云岩将向着理想白云岩演化, 有序度值将无限趋近于 1.0 (理想白云岩有序度)。高压与高温可提高白云岩的演化速度^[20], 因此高压与热作用可提高白云岩的有序度。

本研究中, 雾心亮边型自形粒状白云岩有序度值较低 (0.51), 表明该白云岩结晶速度快, 结晶温度低, 可能是早成岩作用阶段云化的产物, 其云化机理可能为 Adams and Rhodes^[21]提出的渗透回流云化模式。

截面污浊型白云岩有序度值高于雾心亮边型白云岩, 可能表明截面污浊型白云岩结晶速度低; 相比于自形粒状结构白云岩 (0.6), 他形粒状结构白云岩

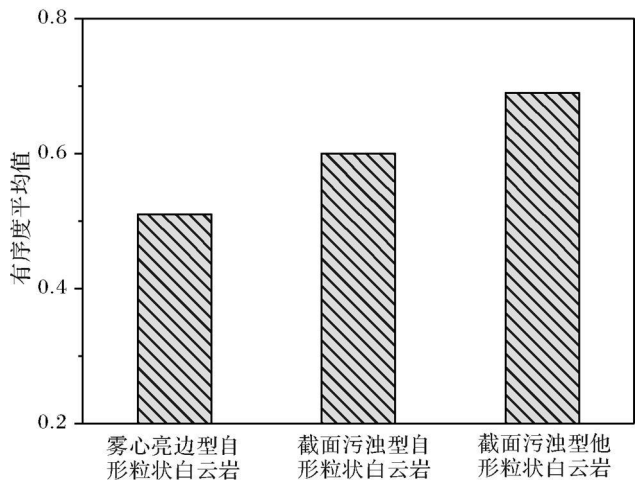


图 5 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩有序度平均值统计图

Fig 5 The average statistical order degree values for CBED and DED/DSD

有序度更高 (0.69), 指示他形粒状白云岩受热改造作用, 热改造作用一方面改变了晶体的物理特征 (晶形), 同时提高了白云岩的有序度。

4.3 微量稀土元素

在塔里木盆地奥陶系泥晶灰岩^[15]标准化图解上, 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩皆表现为富集 Rb, Th, Nb, Ti 等陆壳富集元素 (图 6), 体现了陆源碎屑特征, 指示了其交代流体可能淋滤了陆源碎屑矿物。该特征符合渗透回流型白云岩化模式, 蒸发卤水回流过程中淋滤了陆源碎屑矿物, 导致了交代白云岩地球化学上有陆源特征。

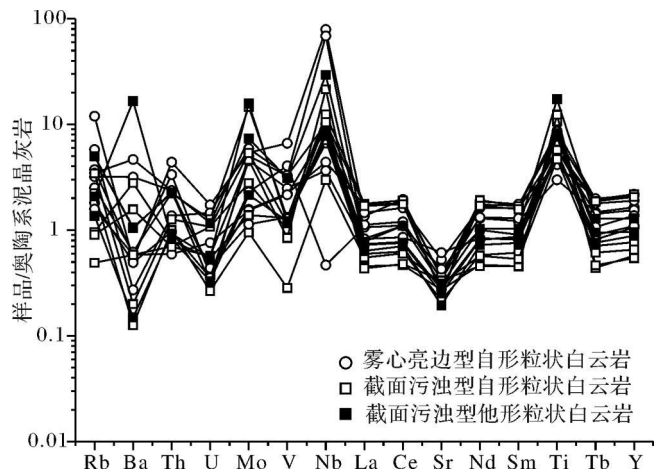


图 6 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩微量元素蛛网图

Fig 6 The spider map of bulk trace elements for CBED and DED/DSD

稀土元素 PAAS 标准化配分模式上, 雾心亮边型白云岩稀土元素含量明显高于截面污浊型白云岩; 且截面污浊型白云岩中, 自形粒状结构白云岩稀土元素含量低于他形粒状白云岩 (图 7)。然而对于稀土元素配分模式来说, 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩皆表现出右倾的配分模式, 体现了一致的流体来源。

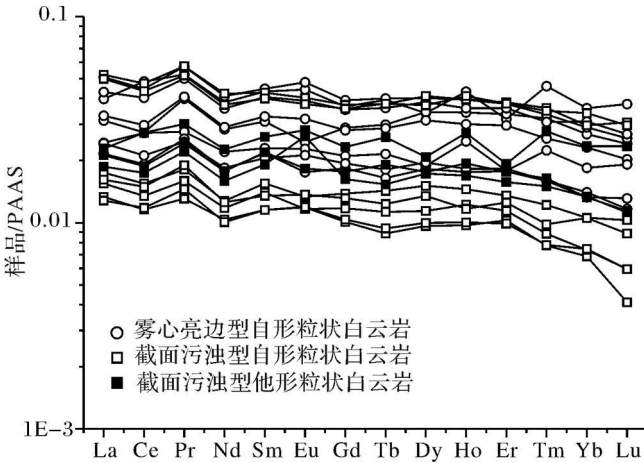


图 7 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩稀土元素配分图

Fig 7 The PAAS normalized rare earth elements patterns for CBED and DED/DSD

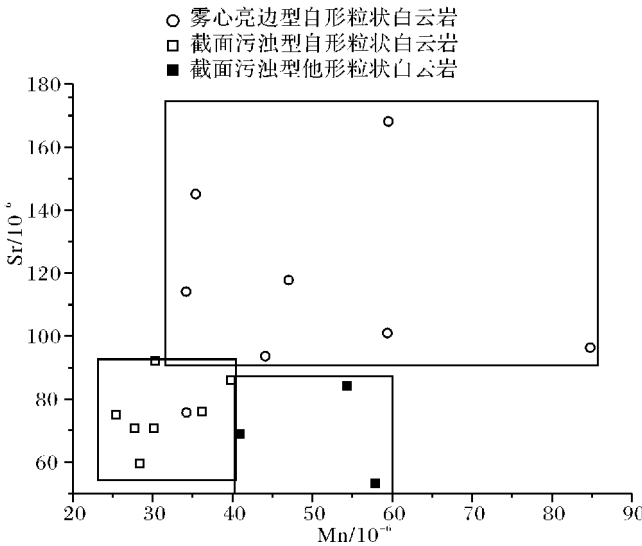


图 8 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩 Mn—Sr 图

Fig 8 The bulk Mn—Sr diagram for CBED and DED/DSD

白云岩成岩作用过程中将向着高 Fe、Mn 含量、低 Sr 含量演化^[20, 22]。Mn—Sr 图解上, 雾心亮边型白

云岩数据点落在了高 Mn 高 Sr 端 (图 8), 指示了其演化程度较低, 与其低有序度特征一致。相比于雾心亮边型白云岩, 截面污浊型白云岩 Sr 含量较低, 指示其演化成熟度较高; 截面污浊型白云岩中, 自形粒状结构白云岩显示贫 Mn 特征, 而他形粒状结构白云岩则显示了富集 Mn 特征, 指示了他形粒状结构的截面污浊型白云岩演化程度更高, 与高有序度值一致。

4.4 同位素

前人研究表明, C 同位素组成变化受很多因素影响, 不适宜作为白云岩云化流体示踪剂^[15]; 本研究中白云岩的 $\delta^{18}O$ 值高于寒武系海水的 $\delta^{18}O$ 值^[23], 指示了该白云岩形成于低温环境中, 其 $\delta^{18}O$ 值的变化可能指示了海水的蒸发程度与大气淡水的加入量。与截面污浊型白云岩相比, 雾心亮边型白云岩具有低 $\delta^{18}O$ 值特征 (图 9), 可能指示了雾心亮边型白云岩后期大气淡水的加入, 而截面污浊型白云岩云化流体为强蒸发海水。

雾心亮边型白云岩与截面污浊型自形粒状白云岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值与古海水一致^[23]; 截面污浊型他形粒状白云岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值稍稍偏高, 可能受热作用的影响, 因为热液白云岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值普遍较高^[24]。

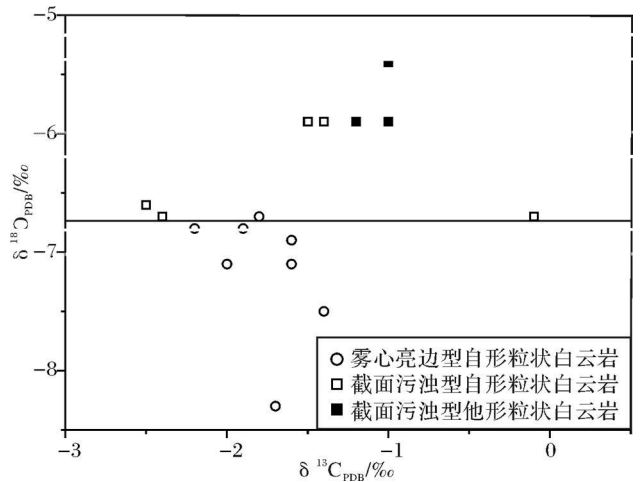


图 9 雾心亮边型白云岩与截面污浊型白云岩全岩碳、氧同位素图解

Fig 9 The bulk $\delta^{13}C - \delta^{18}O$ diagram for CBED and DED/DSD

5 结论

雾心亮边型白云岩为 2 世代交代产物, 第一世代雾心, 交代流体以蒸发海水为主, 第二世代为亮边, 交代流体以海水与大气水混合为主。

洁净明亮型白云岩为混合水云化的产物, 只是核

部交代期混合中海水比例高, 边部交代期混合水中大气水混合比例高。

截面污浊型则由蒸发海水交代形成, 截面污浊型他形粒状白云岩为截面污浊型自形粒状白云岩受热改造作用的产物, 导致了高的有序度与高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。

参考文献 (References)

- Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. Concepts and models of dolomitization [M]. Special Publishing SEPM, 1980 28: 320
- Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics [J]. AAG Bulletin 1995 79 (2): 186-204
- Warren J. Dolomite occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews 2000 52: 1-81
- 顾家裕. 塔里木盆地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 genesis of dolostones occurring in Lower Ordovician, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000 21(2): 120-122]
- 赵宗举, 范国章, 吴兴宁, 等. 中国海相碳酸盐岩的储层类型、勘探领域及勘探战略 [J]. 海相油气地质, 2007, 12(1): 1-11 [Zhao Zongju, Fan Guozhang, Wu Xingning, et al. Reservoir types, exploration domains and exploration strategy of marine carbonates in China [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007 12(1): 1-11]
- Hanshaw B B, Back W, Deke R G. A geochemical hypothesis of dolomitization by ground water [J]. Economy Geology, 1971, 66: 710-724
- Hsu K J, Schneider J. Progress Report on Dolomitization Hydrology of Abu Dhabi Sabkhas, Arabian Gulf [M]. The Persian Gulf New York: Springer, 1973: 409-422
- Warren J K. Sedimentology and mineralogy of dolomitic Coorong lakes, South Australia [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1990, 60(6): 843-858
- 陈永权, 周新源, 赵葵东, 等. 塔里木盆地塔中 1 井藻纹层白云岩与竹叶状白云岩成因—基于岩石学、元素与同位素地球化学的厘定 [J]. 地质学报, 2008, 82(6): 826-834 [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Zhao Kuilong, et al. Geochemical research on straticulate dolomite and spatulate dolomite in Lower Ordovician strata of Tazhong1 well, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008 82(6): 826-834]
- 邵龙义, 何宏, 彭苏萍, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理 [J]. 古地理学报, 2002, 4(2): 19-27 [Shao Longyi, He Hong, Peng Suping, et al. Types and origin of dolostones of the Cambrian and Ordovician of Bachu uplift area in Tarim Basin [J]. Journal of Paleogeography, 2002 4(2): 19-27]
- 沈昭国, 陈永武, 郭建华. 塔里木盆地古生界白云石化成因机理及模式探讨 [J]. 新疆石油地质, 1995, 16(4): 319-324 [Shen Zhaoguo, Chen Yongwu, Guo Jianhua. The Genetic mechanism and models of dolomitization in Lower Paleozoic, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 16(4): 319-324]
- 吴仕强, 朱井泉, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩结构构造类型及其形成机理 [J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1390-1400 [Wu Shiqiang, Zhu Jingquan, Wang Guoxue, et al. Types and origin of Cambrian-Ordovician dolomites in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008 24(6): 1390-1400]
- 胡忠贵, 郑荣才, 文华国, 等. 川东邻水—渝北地区石炭系黄龙组白云岩成因 [J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1369-1378 [Hu Zhonggui, Zheng Rencai, Wen Guohua, et al. Dolomite genesis of Huanglong Formation of Carboniferous in Linshui of eastern Sichuan-northern Chongqing area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008 24(6): 1369-1378]
- 濮巍, 高剑峰, 赵葵东, 等. 利用 HBA 和 BCTA 快速分离 Sm-Nd-Rb-Sr 方法 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 445-450 [Pu Wei, Gao Jianfeng, Zhao Kuilong, et al. Separation method of Rb-Sr, Sm-Nd using DCTA and HBA [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2005 41(4): 445-450]
- 郭琨. 海洋手册 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984 [Guo Kun. Marine Manual [M]. Beijing: Marine Publishing House, 1984]
- 陈永权, 周新源, 赵葵东, 等. 塔里木盆地中寒武统泥晶白云岩红层的地球化学特征与成因探讨 [J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 283-294 [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Zhao Kuilong, et al. Geochemical research on Middle Cambrian supratidal red dolostones in Tarim Basin: implications for dolomite genesis [J]. Geological Journal of China Universities, 2008 14(4): 283-294]
- 杨威, 王清华, 刘效曾. 塔里木盆地和田河气田下奥陶统白云岩成因 [J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 544-548 [Yang Wei, Wang Qinghua, Liu Xiaozeng. Dolomite origin of Lower Ordovician in Hetian River Gas Field, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000 18(4): 544-548]
- 何莹, 鲍志东, 沈安江, 等. 塔里木盆地牙哈—英买力地区寒武系—下奥陶统白云岩形成机理 [J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 806-818 [He Ying, Bao Zhidong, Shen Anjiang, et al. The genetic mechanism of dolostones of the Cambrian-Lower Ordovician in Yaha-Yingmaili Region, Tarim Basin: dolomitization through deep buried hydrothermal fluid [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006 24(6): 806-818]
- 刘永福, 殷军, 孙雄伟. 塔里木盆地东部寒武系沉积特征及优质白云岩储层成因 [J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 126-132 [Liu Yongfu, Yin Jun, Sun Xiongwei. Cambrian sedimentary characteristics and origin of high quality dolomite reservoirs in Eastern Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 126-132]
- Wu Y, Wu Z. Diagenetic modification of dolomite in middle Ordovician carbonates, Taiyuan City area, China [J]. Sedimentary Geology, 1998, 116: 143-156
- Adams J F, Rhodes M L. Dolomitization by seepage reflux [J]. AAPG Bulletin 1960 44: 1912-1920
- Tucker M, Wright V P. Carbonate Sedimentology [M]. Blackwell Scientific Publications Oxford 1990: 482
- Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. Chemical Geology, 1999, 161: 59-88
- Gasparrini M. Massive hydrothermal dolomites in the southwestern Cantabrian Zone (Spain) and their relation to the Late Variscan oro-

tion[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23: 543-568

Geochemical Research and Genesis of Dolostones with Different Crystal Characteristics Occurring in the Upper Cambrian Central Area of Tarim Basin

CHEN Yong-quan ZHOU Xin-yuan YANG Hai-jun

(Tarim Oil Field Company Exploration and Development Research Institute, CNPC, Korla, Xinjiang 841000)

Abstract In Tarim basin occurs a large amount of dolostone strata in which contains plenty of good reservoir. In this paper, petrology and geochemistry methods were attempted to reveal the genesis of dolostones with different crystal characteristics and the subjects were the dolostones of the upper Cambrian in the central area of Tarim basin. According to the petrology, the studied dolostones can be divided into "C body center with bright rim" type of euhedral dolomite (CBED), "clean and light" type of euhedral dolomite (CLED) and "dirty section" type of euhedral/subhedral dolomite (DED or DSD). The geochemical results show that the Mg/Ca of CBED, DSD and DED vary in 0.76-0.93, of the three types, the Mg/Ca value of DSD is the highest, which indicates DSD might have been on the highest evolving stage. There is a considerable coincidence between CBED and CLED, with Ca enriched in rim and Mg enriched in core, which indicates the meteoric water had taken part in at the late crystal stage. The order degrees of CBED, DED and DSD are 0.51, 0.6, 0.69 respectively, which suggests that the crystal speed of CBED is fast and the DSD might have been affected by thermal alteration resulting in the high order degree and high evolving stage. The Rb, Th, Ti enriched characteristics and the right inclined PAAS-normalized REE patterns suggest that the CBED, DED and DSD might have derived Mg from evaporated seawater. The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of CBED, DED and DSD range in -2.5‰ — -1.0‰ and -8.3‰ — -5.4‰ respectively and the $\delta^{18}\text{O}$ values of CBED are lower than those of DED or DSD, which coincides with the joining of the meteoric water. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varies in 0.708835-0.709204, coincident with paleo-seawater. Therefore, conclusions were reached: 1) the crystallization of CBED can be divided into two stages: center stage and rim stage, of which the dolomitization fluid are evaporated seawater and mixed seawater and meteoric water, respectively; 2) CLED is results of mixed water dolomitization, however the different proportion of seawater and meteoric water lead to different composition of dolomite in core and rim; 3) DED and DSD are results of dolomitization by evaporated seawater, of which DSD had suffered thermal alteration, which may result in the higher order degree, higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values and higher evolving stage.

Key words Tarim Basin; Cambrian; dolostone; genesis; geochemistry