

# 塔里木盆地柯坪地区下寒武统吾松格尔组白云岩地球化学特征及其成因演化

南航宇<sup>1</sup>, 张天付<sup>2,3</sup>, 谢淑云<sup>1</sup>, 周玥<sup>1</sup>, 况志伟<sup>1</sup>, 马佳怡<sup>1</sup>

1 中国地质大学(武汉)地球科学学院; 2 中国石油杭州地质研究院; 3 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

**摘要** 以塔里木盆地柯坪地区野外出露的吾松格尔组为研究对象,通过岩相学、地球化学分析,探讨研究区吾松格尔组白云岩白云石化成因及白云石化流体来源,分析可能的白云石化模式。样品微量元素特征表明白云岩受到较小的陆源碎屑物质影响,形成于气候干旱炎热、海水咸化且氧化的沉积环境;相对较低的 $\Sigma\text{REE}$ 值(5.51~89.10  $\mu\text{g/g}$ ,平均值为27.32  $\mu\text{g/g}$ )及明显的 $\delta^{13}\text{C}$ 低负值(-3.14‰~-0.73‰)、 $\delta^{18}\text{O}$ 高负值(-10.45‰~-6.19‰)的特征显示其成岩过程受到明显大气淡水淋滤影响; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值以及与海水来源白云岩相似的稀土元素配分特征及高于正常海水的盐度指数(Z值)均表明白云石化流体主要来源于高盐度海水。

**关键词** 白云岩; 地球化学特征; 成因模式; 吾松格尔组; 柯坪地区; 塔里木盆地

**中图分类号**: TE122.2

**文献标识码**: A

## 0 前言

白云岩储层是国内外油气勘探的重要的目标。据统计,全球约有60%以上的油气产自碳酸盐岩储层,其中一半产自白云岩储层<sup>[1]</sup>。目前,国内发现的五大海相油气田(塔河、靖边、普光、元坝、安岳)中的4个与白云岩储层密切相关。关于白云岩的成因问题依然受到学者们的广泛关注。白云岩成因的主要观点包括原生沉淀作用(准同生交代白云岩)及白云石化作用(次生交代白云岩),而白云石化作用被认为是形成白云岩的主要途径。通过前人的大量研究,白云石化作用又可分为渗透回流模式<sup>[2]</sup>、萨布哈模式、混合水模式<sup>[3]</sup>等早期白云石化作用,以及埋藏白云石化模式<sup>[4]</sup>、热液白云石化模式<sup>[5]</sup>等晚期白云石化作用。早期白云石化作用多与沉积环境以及沉积相带有关,晚期白云石化作用受控于碳酸盐岩的晚期成岩改造。

塔里木盆地寒武系盐下分布着大规模的白云岩地层,其上覆中寒武统巨厚膏盐层、下接玉儿吐斯组烃源岩,具有良好的源-储-盖配置关系,油气

资源丰富,是塔里木盆地油气勘探的战略接替区。前期,中深1井和中深5井虽在盐下肖尔布拉克组获得油气突破,但受限于盐下储层埋深大、构造演化复杂等因素影响,盐下储层的成因及勘探前景尚存在争议。近年来,轮探1井<sup>[6]</sup>及柯探1井相继在吾松格尔组获得高产工业油气流,使得吾松格尔组有望成为寒武系盐下白云岩领域风险勘探的新层位。

前人曾对盆地重点区域的下寒武统整体开展了岩相古地理研究<sup>[7-8]</sup>;朱永进等<sup>[9]</sup>开展了吾松格尔组(紧邻中寒武统膏盐岩盖层)的岩相古地理研究,并预测了储层有利区带;张天付等<sup>[10]</sup>梳理了柯坪地区吾松格尔组的岩性组合及储集空间类型,并尝试讨论了沉积相演化以及储层成因。然而,目前对柯坪地区白云岩成因的探讨及认识仍然存在不足,基于此,本文拟通过柯坪地区露头剖面的吾松格尔组白云岩的岩石学分析,结合各类白云岩主量元素、微量元素、C/O/Sr同位素组成等多种方法探讨白云岩成因及白云石化模式,以期对储层的形成机制及优质储层的预测提供依据。

收稿日期: 2023-03-10; 改回日期: 2023-08-23; 网络出版日期: 2023-10-16

本文受中国石油天然气股份公司重大科技专项“海相碳酸盐岩有效储层形成与保持机理及分布预测研究”(编号: 2021DJ0503)和“碳酸盐岩油气藏提高采收率关键技术研究”(编号: 2021DJ1501)联合资助

**第一作者**: 南航宇,在读硕士研究生,地质学专业(地球化学方向),主要从事碳酸盐岩储层溶解动力学研究。通信地址: 430074 湖北省武汉市洪山区关山街道鲁磨路388号 中国地质大学(武汉)西区地勘楼; E-mail: nhyy@cug.edu.cn

**通信作者**: 谢淑云,教授,地球化学专业,主要从事碳酸盐岩储层溶解动力学与覆盖区地球化学找矿及定量地球化学的研究工作。通信地址: 430074 湖北省武汉市洪山区关山街道鲁磨路388号 中国地质大学(武汉)西区地勘楼; E-mail: tinaxie@cug.edu.cn

## 1 地质背景

塔里木盆地发育在太古宇—元古宇的结晶基底和变质褶皱基底之上,是一个长期演化的大型叠合复合盆地<sup>[11]</sup>。柯坪地区位于塔里木盆地西北缘(图1),其东北部为库车坳陷,东部为阿瓦提坳陷,南部为麦盖提斜坡,包括柯坪凸起和温宿凸起两个单元,其主构造体系由北东走向展布的一系列冲断层和由冲断层控制的推覆体组成,同时受到塔里木盆地构造变动

和天山褶皱系活动的影响<sup>[10,12]</sup>。这些推覆体构成了如今地貌上的山系,使得区内寒武系出露较为齐全,由下至上包括下寒武统玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组,中寒武统沙依里克组和阿瓦塔格组。沉积上,研究区从早寒武世玉尔吐斯期的深水陆棚演化至肖尔布拉克期的碳酸盐缓坡和吾松格尔期的局限台地(图1),沉积环境的水深有逐渐变浅的趋势。本文以柯坪地区夏特、苏盖特野外露头剖面为研究对象,样品取自下寒武统吾松格尔组。

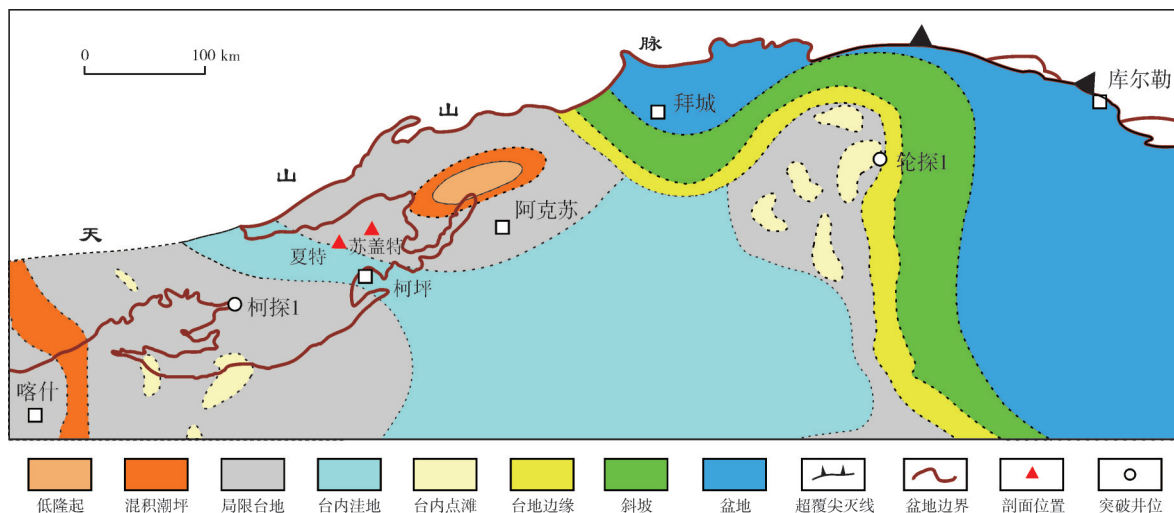


图1 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组沉积期岩相古地理图(修改自文献[9])

Fig. 1 Lithofacies palaeogeographic map of Wusongger Formation in Keping area, Tarim Basin (cited from reference [9], modified)

## 2 样品和实验方法

实验样品取自柯坪地区夏特剖面 and 苏盖特剖面(剖面位置见图1)的吾松格尔组底部、中部和顶部的相同层位,共取7块样品,其中夏特剖面取样3块,苏盖特剖面取样4块。在手标本样品基础上,通过薄片、阴极发光鉴定将样品分类命名,之后将样品粉碎成小碎块,挑选出未被风化溶蚀、未被方解石脉充填的新鲜碎块,以保证样品的可靠性;在室内利用玛瑙研钵将其研磨并过200目筛后,用塑料样品袋包装,按照不同实验测试需求分别对样品进行测试分析。

全岩矿物组成分析在中国地质大学(武汉)材料与化学学院X射线衍射仪(XRD)实验室完成,检测设备为德国Bruker AXS D8-Focus X射线衍射仪。部分样品采用两酸( $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ )溶样罐溶样方法进行样品的化学预处理,然后利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定方法对样品进行稀土元素及微

量元素分析<sup>[13]</sup>。

碳、氧同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。应用纯磷酸法制备 $\text{CO}_2$ ,将所获得的 $\text{CO}_2$ 在气体稳定同位素比值质谱仪(MAT-253plus)上进行质谱分析,分析结果采用VPDB标准,测试结果 $\delta^{18}\text{O}$ 标准偏差小于0.06‰,  $\delta^{13}\text{C}$ 标准偏差小于0.03‰。

锶同位素组成分析测试由中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室多接收等离子体质谱仪(Nu Plasma II型MC-ICP-MS)完成。实验全流程空白本底值约为 $3 \times 10^{-10} \text{ g}$ , Sr 987标样的测试精度为 $0.710\,223 \pm 0.000\,034 (2\sigma, n=7)$ ,具体分析流程可参见文献[14]。

## 3 岩石学特征

柯坪地区吾松格尔组位于古隆起的构造高部位,沉积期气候干旱,受塔北古陆和塔南隆起的影响,整体为局限台地下的潮坪环境<sup>[10]</sup>。通过对柯坪



地区2个野外露头剖面白云岩样品的分析,识别出吾松格尔组的主要岩性包括泥质泥粉晶白云岩、颗粒白云岩、晶粒白云岩、角砾化白云岩以及藻白云岩。

**泥质泥粉晶白云岩** 发育于夏特和苏盖特剖面吾松格尔组的下部和中上部,原始结构保存较好,镜下白云石多为粉晶级,晶间充填泥质,偶见石英碎屑,整体较致密,孔隙不发育,裂缝少量发育,部分被方解石完全充填(图2a)。

**颗粒白云岩** 发育于苏盖特剖面吾松格尔组中部,具有明显的颗粒幻影结构特征。以藻砂屑为主

的颗粒受到后期白云石化作用,部分颗粒边缘比较模糊,颗粒中心仍保留早期泥质,镜下显示暗灰色,其粒径为100~500  $\mu\text{m}$ 不等,偶见溶孔被后期方解石充填,孔隙几乎不发育(图2b),反映沉积期动荡的水体环境。

**晶粒白云岩** 发育于苏盖特剖面吾松格尔组颗粒滩层的顶部。镜下可见原始结构基本消失,偶见模糊颗粒幻影,白云石晶体边缘不连续,以半自形为主,呈现镶嵌状结构;裂隙被后期结晶方解石充填,镶嵌紧密;发育粒间溶孔、晶间孔(图2c,2d)。

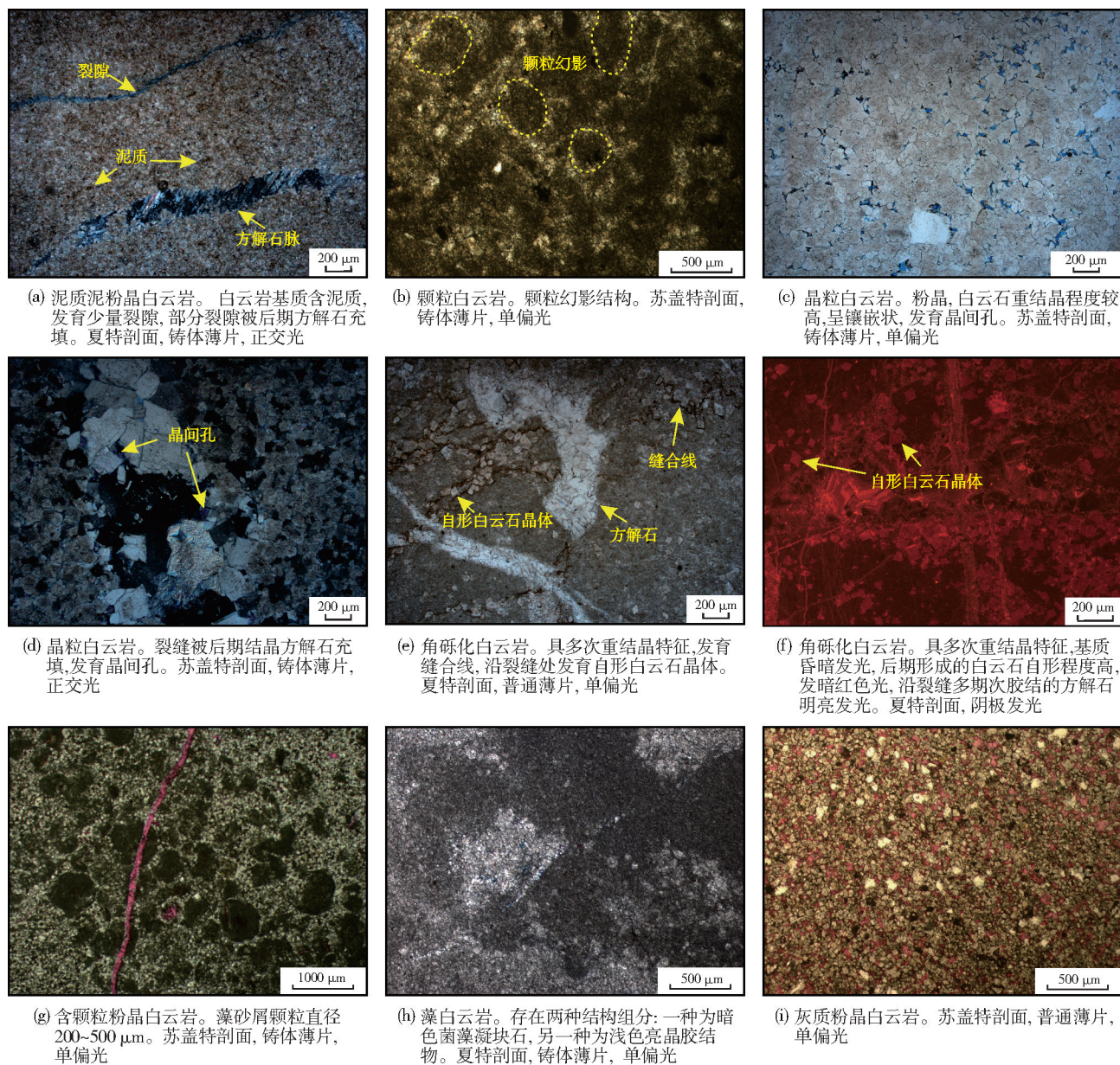


图2 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组白云岩样品显微照片

Fig. 2 Micrographs of dolomite samples of Wusonggeer Formation in Keping area, Tarim Basin



角砾化白云岩 发育于夏特剖面吾松格尔组顶部。镜下可见后期裂缝贯穿先期缝合线, 裂缝被后期结晶方解石胶结, 充填紧密(图 2e); 阴极发光可见白云石基质为暗红褐色, 后期形成的自形白云石(粒径约为  $50\ \mu\text{m}$ ) 发暗红色光, 晚期胶结方解石为亮橘黄色(图 2f)。

藻白云岩 发育于夏特剖面吾松格尔组顶部, 微观上以 2 种结构组分为主: 一种为暗色菌藻类凝块结构, 主要由富菌藻的粉晶白云石组成, 镜下为暗色凝块状; 另一种为胶结物, 主要由亮晶白云石组成, 晶体比前者粗, 可达细晶级(图 2h)。

## 4 地球化学特征

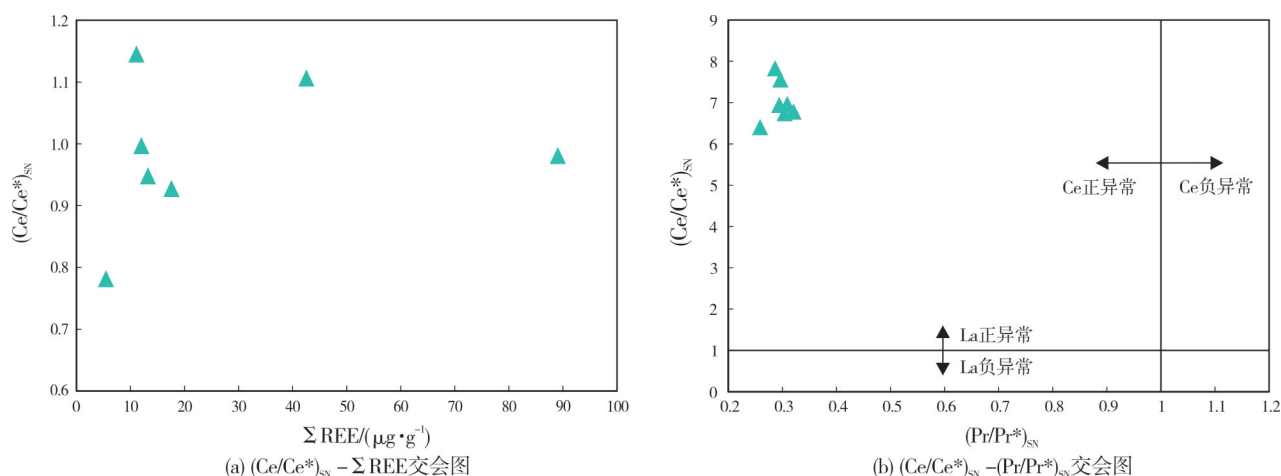
### 4.1 微量元素

对研究区吾松格尔组白云岩的 7 件样品进行了微量元素测试。从表 1 可以看出样品 Sc 含量(平均值为  $1.22\ \mu\text{g/g}$ )、Th 含量(平均值为  $1.28\ \mu\text{g/g}$ )、Hf 含量(平均值为  $0.36\ \mu\text{g/g}$ )、Zr 含量(平均值为  $13.96\ \mu\text{g/g}$ )均远远低于上地壳中的含量(Sc:  $14.9\ \mu\text{g/g}$ , Th:  $2.3\ \mu\text{g/g}$ , Hf:  $5.8\ \mu\text{g/g}$ , Zr:  $240\ \mu\text{g/g}$ ), 表明研究区样品均未受到陆源沉积物显著影响。此外, 成岩作用过程会影响岩石中的稀土元素含量, 导致样品的  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}}$  与  $\Sigma\text{REE}$  显示良好相关性, 而本研究的样品  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}}$  与  $\Sigma\text{REE}$  相关性较差(图 3a, 表 2), 表明样品未受到明显的成岩作用影响。

U 元素多倾向于在还原环境富集<sup>[16]</sup>, Th 对氧化-

还原环境不敏感, 不受氧化-还原环境影响, 由于 Th 和 U 在不同氧化-还原条件下表现出不同的特征, 故 U/Th 值可作为氧化-还原环境的判别指标<sup>[17]</sup>。一般认为高 U/Th 值 ( $> 1.25$ ) 多指示缺氧环境, 低 U/Th 值 ( $< 0.75$ ) 多指示氧化环境。V 在海相氧化环境下以高价态 ( $\text{H}_2\text{VO}_4^-$ ) 形式存在, 而在缺氧环境下被还原为低价态沉积下来<sup>[18]</sup>; Cr 在缺氧条件下被还原, 易与腐殖酸结合形成复杂化合物或复杂结构吸附在铁锰氢氧化物表面<sup>[19]</sup>。通常将 V/Cr 值用于判定古海洋沉积环境, 认为 V/Cr 值  $< 2$  指示氧化的沉积环境, 而  $2 < \text{V/Cr}$  值  $< 4.5$  指示次氧化沉积环境, V/Cr 值  $> 4.5$  指示缺氧沉积环境<sup>[20]</sup>。此外,  $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$  值也被用作判断氧化-还原条件的有效指标。由基于多种氧化-还原指标的沉积环境判别图(图 4)可见,  $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$  值、V/Cr 值均反映出研究区样品主要形成于氧化-次氧化环境中(图 4a); 而 U/Th 出现少部分较高的值(图 4b), 推测是由于古老地层 Th 元素衰变以及热液活动影响导致的 U 元素含量增高, 使得 U/Th 值增大。

Sr 元素在干旱气候下会随着盐类析出从而导致岩石中的 Sr 含量高值, 而 Ba 的化合物溶解度比 Sr 低, 在淡水环境向海相过渡的过程中, Sr/Ba 值增大的趋势较为明显, 故可利用 Sr/Ba 值来反映古盐度变化趋势。一般认为 Sr/Ba 值  $> 1$  为海相沉积, 而 Sr/Ba 值  $< 1$  则反映陆相沉积<sup>[21]</sup>。研究区样品的 Sr/Ba 值大部分大于 1, 平均值为 5.64(表 1), 表明研究区白云岩沉积时的蒸发作用强, 成岩流体来自于较为咸



注:  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}} = 2 \times \text{Ce}/(\text{La}_{\text{SN}} + \text{Pr}_{\text{SN}})$ ,  $(\text{Pr}/\text{Pr}^*)_{\text{SN}} = 2 \times \text{Pr}/(\text{Ce}_{\text{SN}} + \text{Nd}_{\text{SN}})$ ;  $(\text{Pr}/\text{Pr}^*)_{\text{SN}} < 1$  表明存在 Ce 正异常,  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}} < 1$  表明存在 La 负异常; 下标 SN 代表海水标准化。

图 3 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组白云岩海水标准化的  $(\text{Pr}/\text{Pr}^*)_{\text{SN}} - (\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}}$  和  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}} - \Sigma\text{REE}$  交会图 (据文献[15]修改)

Fig. 3 Crossplots of seawater normalized  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}} - (\text{Pr}/\text{Pr}^*)_{\text{SN}}$  and  $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}} - \Sigma\text{REE}$  of Wusonggeer Formation's dolomite in Keping area, Tarim Basin (cited from reference [15], modified)

表1 塔里木盆地柯坪地区吾松格组白云岩微量元素含量及特征参数  
Table 1 Contents and characteristic parameters of trace element of Wusonggeer Formation's dolomite in Keping area, Tarim Basin

样品号	样品类型	微量元素含量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )														特征参数			
		Sc	Th	Hf	Zr	U	V	Cr	Ni	Cu	Rb	Sr	Y	Ba	U/Th	V/Cr	V/(V+Ni)	Sr/Ba	Sr/Cu
XT-1	泥质泥粉晶白云岩	0.840	1.410	0.540	19.73	1.650	6.54	5.34	4.69	2.04	17.380	147.53	1.74	251.17	1.17	1.22	0.58	0.59	72.22
XT-2	角砾化白云岩	0.440	0.200	0.060	2.08	1.570	3.94	2.94	4.55	2.16	1.600	313.64	0.73	14.82	7.69	1.34	0.46	21.16	145.13
XT-3	藻白云岩	0.626	0.270	0.067	2.67	0.783	52.70	16.30	41.10	3.43	1.170	54.20	3.12	25.60	2.90	3.23	0.56	2.12	15.80
SGT-1	细晶白云岩	0.530	0.600	0.110	4.01	0.290	5.91	2.65	3.05	1.26	2.760	88.97	1.98	51.48	0.48	2.23	0.66	1.73	70.60
SGT-2	颗粒白云岩	1.570	1.930	0.505	19.50	1.680	31.20	17.00	36.70	10.60	13.300	97.70	8.26	43.30	0.87	1.97	0.46	2.26	9.22
SGT-3	灰质粉晶白云岩	4.120	4.360	1.190	47.70	1.240	34.80	89.70	59.10	20.20	23.500	242.00	11.80	309.00	0.28	2.05	0.37	0.78	11.98
SGT-4	含颗粒粉晶白云岩	0.412	0.192	0.044	2.00	0.771	29.50	6.13	43.10	4.76	0.791	65.40	2.20	6.05	4.02	0.33	0.41	10.81	13.74

表2 塔里木盆地柯坪地区吾松格组白云岩稀土元素含量及特征参数  
Table 2 Contents and characteristic parameters of REE of Wusonggeer Formation's dolomite in Keping area, Tarim Basin

样品号	样品类型	稀土元素含量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )														特征参数			
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Yb	Lu	$\Sigma\text{REE}$	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	(Nd/Yb) <sub>N</sub>	(Ce/Ce*) <sub>SN</sub>	(Pr/Pr*) <sub>SN</sub>	
XT-1	泥质泥粉晶白云岩	3.16	5.74	0.61	2.17	0.38	0.07	0.32	0.05	0.30	0.06	0.17	0.02	13.26	10.83	4.71	6.94	0.29	
XT-2	角砾化白云岩	1.73	2.27	0.21	0.73	0.14	0.02	0.12	0.02	0.12	0.02	0.05	0.01	5.51	12.89	5.61	6.40	0.26	
XT-3	藻白云岩	4.03	7.24	0.81	2.97	0.56	0.13	0.53	0.10	0.58	0.10	0.21	0.03	17.61	8.37	5.08	6.74	0.30	
SGT-1	灰质白云岩	2.00	4.84	0.51	2.06	0.43	0.09	0.38	0.06	0.34	0.07	0.14	0.02	11.13	8.23	5.34	7.83	0.29	
SGT-2	颗粒白云岩	7.64	17.90	1.96	7.74	1.61	0.32	1.39	0.27	1.53	0.29	0.80	0.11	42.58	6.87	3.52	7.56	0.30	
SGT-3	灰质粉晶白云岩	18.00	36.70	4.40	17.30	3.31	0.70	2.47	0.46	2.42	0.43	1.20	0.18	89.10	9.25	5.25	6.78	0.32	
SGT-4	含颗粒粉晶白云岩	2.41	4.92	0.57	2.26	0.49	0.09	0.41	0.07	0.37	0.07	0.15	0.02	12.05	8.13	5.56	6.96	0.31	

化的海水。 $Sr/Cu$  值通常用来指示沉积期气候特征, 研究认为  $Sr/Cu$  值  $> 5$  指示干旱气候<sup>[21]</sup>。研究区样

品的  $Sr/Cu$  值均远大于 5 (表 1), 表明研究区在白云岩沉积期处于干旱气候条件。

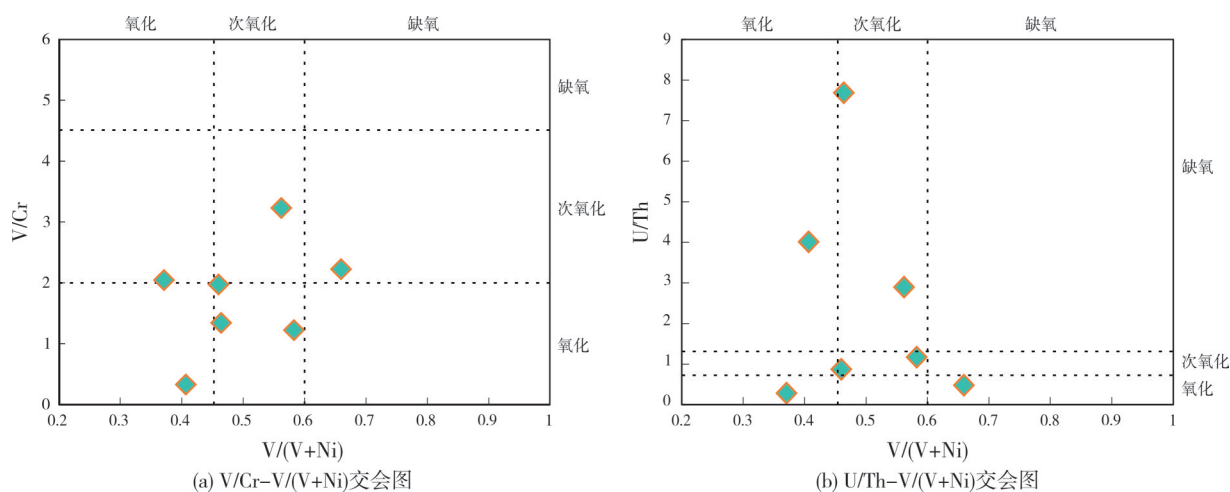


图 4 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组白云岩沉积环境判别图

Fig. 4 Sedimentary environment discrimination diagram of Wusongger Formation's dolomite in Keping area, Tarim Basin

## 4.2 稀土元素

稀土元素特征常被用于示踪白云岩的物质来源和形成过程<sup>[22-23]</sup>。这是因为自然界中绝大部分流体的稀土元素含量远未达到能改变原岩稀土元素含量特征的程度, 而白云石化作用后的其他成岩作用对白云岩稀土元素组成及其地球化学特征的影响被认为比较小<sup>[24]</sup>, 因此, 可用白云岩的稀土元素组成来反演原始成岩流体的性质。近些年来, 利用稀土元素配分特征来研究白云石化流体来源和白云岩成因均取得了重要进展<sup>[15, 25]</sup>。

本文采用 Kawabe 等<sup>[26]</sup>发表的海水 REE 组成对数据进行标准化处理 (图 5)。结果表明: 样品  $\Sigma REE$  变化范围为  $5.51 \sim 89.10 \mu g/g$ , 平均为  $27.32 \mu g/g$ , 含量均较低 (表 2), 总体处于海相碳酸盐岩  $\Sigma REE$  值变化范围内 (海相碳酸盐岩  $\Sigma REE$  值一般低于  $100 \mu g/g$ )<sup>[27]</sup>。其中, 吾松格尔组角砾化白云岩 (XT-2 样品) 低水平的  $\Sigma REE$  应该是准同生期大气淡水溶蚀作用所致。

样品轻稀土 (LREE) 总含量范围为  $5.12 \sim 80.41 \mu g/g$ , 平均值为  $24.46 \mu g/g$ ; 重稀土 (HREE) 总含量为  $0.40 \sim 8.69 \mu g/g$ , 平均值为  $2.86 \mu g/g$ ,  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$  值为  $6.87 \sim 12.89$ , 平均值为  $9.22$ 。此外,  $(Nd/Yb)_N$  值被用于判定轻、重稀土元素相对富集程度<sup>[28]</sup>, 各样品  $(Nd/Yb)_N$  值在  $3.52 \sim 5.61$  之间 (表 2), 平均值为

$5.01$ , 高于海水的  $(Nd/Yb)_N$  值, 表明研究区白云岩轻稀土元素明显富集, 而重稀土元素相对亏损, 轻、重稀土分馏明显。

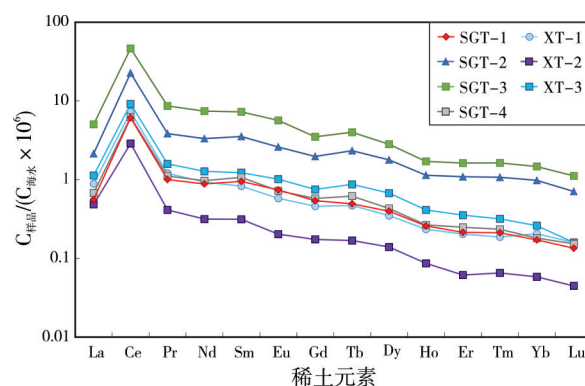


图 5 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组白云岩海水标准化 REE 配分特征

Fig. 5 Seawater standardized REE distribution characteristics of Wusongger Formation's dolomite in Keping area, Tarim Basin

研究区各类白云岩样品均具有不同程度的 Ce 正异常。由于海水中 Ce 含量相对较低, 故经海水标准化后的稀土元素配分模式通常显示正 Ce 异常。利用 Webb 等<sup>[29]</sup>提出的方法, 做出  $(Pr/Pr^*)_{SN} - (Ce/Ce^*)_{SN}$  交会图 (图 3b)。从图中可看出, 样品具有明显 Ce 正异常, 此结果与前人研究结果相一致<sup>[30]</sup>。

胡文瑄等<sup>[25]</sup>总结了白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土判别模式, 认为成岩流体为海水来源并经海水标准化后的白云岩的稀土元素

特征表现为全岩 $\Sigma$ REE低(一般小于20  $\mu\text{g/g}$ ),具有一定程度的Ce正异常,轻稀土稍富集、重稀土配分曲线低且平坦的特征。本次研究的各白云岩样品经海水标准化后呈现不同程度的正Ce异常(图5),轻稀土稍富集,重稀土曲线较平坦的右倾型配分模式,表明本次研究的样品经历了较为相似的成岩过程且成岩流体主要来源于海水。

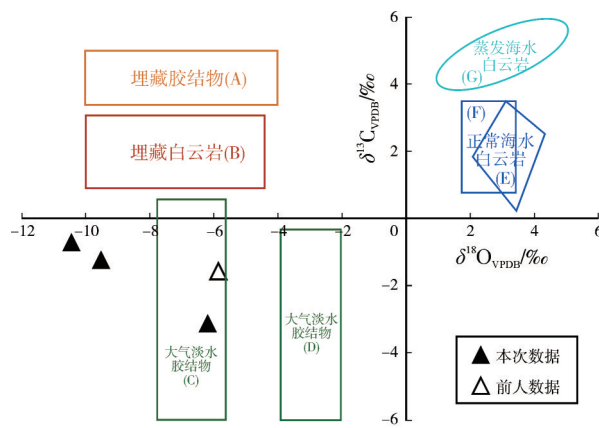
### 4.3 碳、氧稳定同位素

碳酸盐岩对不同的成岩作用反应敏感,目前已经开发出多种判别不同成岩环境、不同成岩作用的分析方法,而稳定碳、氧同位素分析方法是近年来不断被推广的一种有效方法,能有效指示海平面变化、反映不同成岩环境的流体和成岩作用特征<sup>[25]</sup>。大气淡水成岩环境的稳定碳、氧同位素组分普遍偏轻,遵循大气淡水线,即 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围大(从高负值到低正值),而 $\delta^{18}\text{O}$ 值几乎不变(一般为高负值)。

由于寒武系碳酸盐岩年代古老,易受到长期复杂的成岩蚀变作用的影响而改变原始的沉积信息,故此需要对成岩蚀变影响进行评价。研究认为,沉积碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $> -11\text{‰}$ 表示岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本没有受到成岩作用的影响<sup>[33-34]</sup>。本文对白云岩样品进行碳、氧同位素分析,结果显示吾松格尔组白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-3.14\text{‰}$ 、 $-1.25\text{‰}$ 、 $-0.73\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-6.19\text{‰}$ 、 $-9.52\text{‰}$ 、 $-10.45\text{‰}$ ,即样品基本能反映原始的沉积信息,且显示出 $\delta^{13}\text{C}$ 低负值, $\delta^{18}\text{O}$ 高负值的特征,此特征与前人研究的结果一致<sup>[10,30]</sup>。依前文所述,成岩阶段受到大气淡水影响(大气淡水成因的白云岩或受到大气淡水成岩改造)的白云岩普遍具有此特征。通过将本次研究测试样品所得的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值投图至陈梅等<sup>[35]</sup>研究所得的碳、氧稳定同位素特征与成岩关系图上(图6),可以看到本次研究样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的正交投点位置基本都在第3象限处,各样品碳、氧同位素组成具有相似的特点,反映明显受到大气淡水溶蚀作用的影响。

Keith等<sup>[36]</sup>通过对海水和淡水碳酸盐岩进行大量的碳、氧同位素测试,统计得到利用碳、氧同位素组成计算盐度的经验公式: $Z = 2.048 (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 (\delta^{18}\text{O} + 50)$ , $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均为VPDB标准。依据该公式,已知碳、氧稳定同位素组成值,就可计算出岩石沉积时的盐度Z值。当Z值大于120时,岩石为海相成因;当Z值小于120时,岩石为陆相成因

(淡水、湖水)。本次研究所用样品的Z值平均为119.5,反映出样品形成于典型正常海水,只有一个样品小于120,推测在成岩过程有淡水淋滤影响。



注: 图版根据参考文献[35], 来源: A: Moore,1985; B: Wendte,1998; C: Saller,1984; D: Matthews,1974; E: Vahrenkamp,1994; F: Aharon,1987; G: Saller,1998。

图6 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组白云岩的C、O同位素特征与成岩环境(前人数据引自文献[30],图版据文献[35])

Fig. 6 C-O isotope characteristics and diagenetic environment of Wusonggeer Formation's dolomite in Keping area, Tarim Basin (cited from reference [30,35], modified)

### 4.4 锶同位素

锶同位素是研究碳酸盐岩成岩作用的重要手段之一。锶在海水中的滞留时间(约1 Ma)远大于海水的混合时间(约1 ka),通常认为在任意给定的地质时代,全球范围内海水锶同位素的组成是均一的<sup>[37]</sup>。由于Sr同位素在海水中具有长期特殊的变化规律,其分馏不受温度、压力和微生物作用的影响,故通常借助于白云岩的Sr同位素组成特征反演白云石化流体的性质及来源。通常认为白云石化流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值主要受海水来源Sr、壳源Sr(主要来自大陆古老岩石风化)以及幔源Sr(主要来自洋中脊热液系统)的影响<sup>[38]</sup>。研究发现,在白云石化作用过程中Sr含量会逐渐降低,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值会升高。当Sr含量数量级为100  $\mu\text{g/g}$ 时,由流体性质导致的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化数量级通常在 $10^{-3}$ 甚至更高<sup>[39]</sup>。本次研究所选白云岩样品的Sr含量范围为54.2~313.6  $\mu\text{g/g}$ ,平均值为144.2  $\mu\text{g/g}$ ,处于正常白云岩的范围之内;大部分样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值处于早寒武世海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值范围内(0.708 8~0.709 2)<sup>[40]</sup>,但个别样品高于此范围,显示出受壳源Sr影响的特征(图7)。这表明样品的白云石化流体基本为海水,但具有明显受到大气淡水淋滤影响的特征。



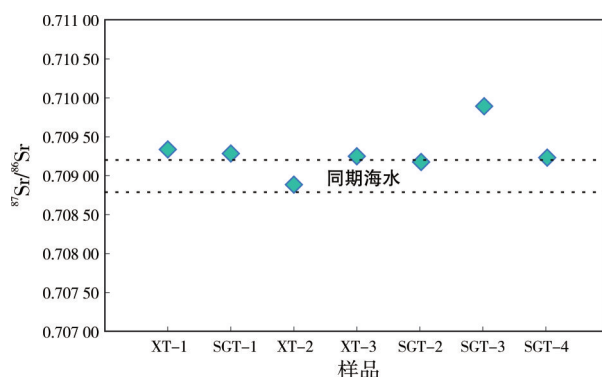


图7 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组白云岩 Sr 同位素组成

Fig. 7 The Sr isotope composition of Wusonggeer Formation's dolomite in Keping area, Tarim Basin

## 5 白云石化模式

早寒武世吾松格尔期,塔里木盆地西部台地主要为混积弱镶边碳酸盐台地<sup>[41]</sup>,局部地区表现出碳酸盐缓坡的特点,可划分出混积潮坪、局限一半局限台地、潟湖、台地边缘、斜坡、海盆及缓坡等7大沉积相、16类亚相及若干微相类型<sup>[9]</sup>。同期,柯坪地区以潮坪相沉积为主,台地边缘、颗粒滩带及潮坪相薄层台内滩构成了吾松格尔组储层发育的重要物质基础<sup>[10,42]</sup>。

吾松格尔组沉积期受到陆源碎屑物质输入影响,在干旱的气候环境下,海水不断蒸发而逐渐趋于咸化。随着膏盐含量的升高,微生物对岩性的影响愈加显著,形成以泥质泥粉晶白云岩、藻白云岩为主的岩性特征,基本保存了原岩结构特征。二者相对较高的 Sr/Cu 值(分别为 72.22、15.80)也表明岩石形成于干旱蒸发环境;较低的 U/Th 值(分别为 1.17、2.90)及高于同期海水的 Sr 同位素组成(分别为 0.709 34、0.709 25)均表明二者主要为萨布哈和微生物白云石化模式下的沉积产物。频繁的海进/海退、不同程度的准同生大气淡水淋滤溶蚀(去膏化作用、溶蚀作用、滑塌作用)及短距离搬运堆积促进了白云岩有效孔隙的发育;原生沉积特征被不断破坏,晶间孔、粒间溶孔发育,形成以晶粒白云岩、角砾化白云岩、颗粒白云岩为主的岩性特征(图8);这3类岩性较低的  $\Sigma \text{REE}$  值(分别为 11.13  $\mu\text{g/g}$ 、5.51  $\mu\text{g/g}$ 、42.58  $\mu\text{g/g}$ )及角砾化白云岩的低 Z 值(119)均显示出明显受大气淡水淋滤影响的特征。在相对高能的环境下发育颗粒白云岩及角砾化白云岩,因其孔隙发育,更有利于高盐度海水向下渗流,导致渗透回流白云石化作用的发生。

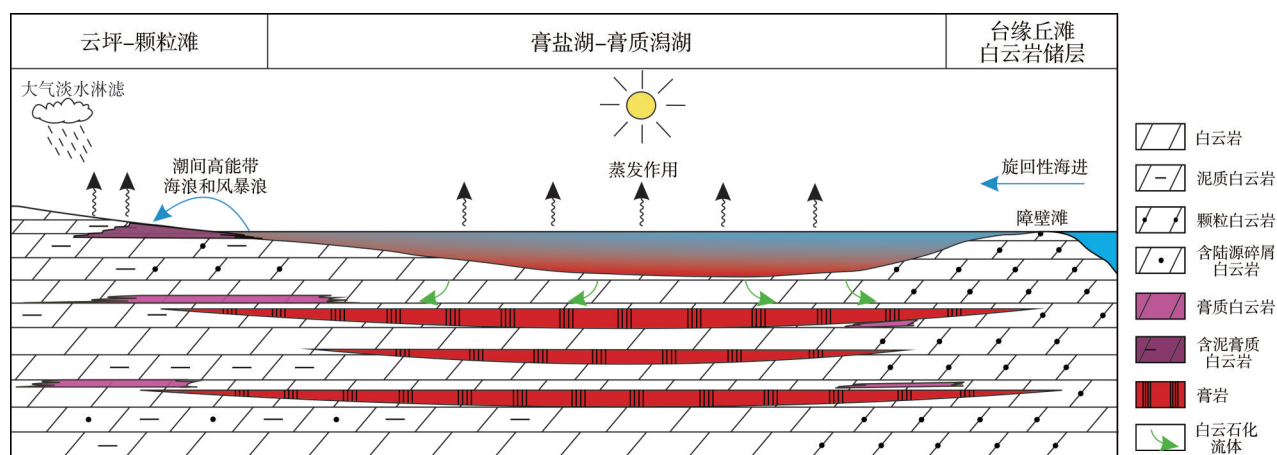


图8 塔里木盆地柯坪地区吾松格尔组白云石化模式图(修改自文献[10])

Fig. 8 Dolomitization pattern of Wusonggeer Formation in Keping area, Tarim Basin (cited from reference [10], modified)

晚期沉积阶段环境封闭,海水持续咸化,膏盐发育;埋藏阶段发生压溶作用,发育缝合线,其与裂缝相互切割,是储集空间的重要补充,同时提高了储层的渗透率。

综上所述,认为研究区吾松格尔组白云岩主要形成于准同生-浅埋藏沉积阶段,为潟湖—潮坪沉积背景下萨布哈模式、微生物白云石化模式、渗透

回流白云石化模式共同作用的产物。

## 6 结论

(1)塔里木盆地柯坪地区早寒武世吾松格尔组沉积期受到微弱的陆源碎屑影响,白云岩样品的 V/(V+Ni)值绝大多数小于 0.6、U/Th 值总体小于 1.25、V/Cr 值均小于 4.5,绝大部分样品 Sr/Ba 值大于 1、Sr/



Cu值大于5,指示样品形成于气候干旱炎热、海水咸化且氧化的沉积环境。

(2)各类白云岩的稀土元素总含量较低,总体处于海相碳酸盐岩的 $\Sigma$ REE值变化范围内,显示出受到大气淡水淋滤的影响;稀土元素配分曲线显示轻稀土元素稍富集、重稀土元素较平坦的右倾配分特征,Sr同位素组成总体处于同时期海水范围,个别高于此范围显示出受壳源Sr影响的特征,据此认为白云石化流体主要来源于海水;稳定碳、氧同位素组成显示明显的 $\delta^{13}\text{C}$ 低负值、 $\delta^{18}\text{O}$ 高负值的特征,反映沉积阶段受到大气淡水淋滤影响;盐度指数(Z值)指示样品形成于盐度较大的流体。综合分析认为白云石化流体为蒸发成因的高盐度海水。

(3)潮坪相高能环境以及准同生大气淡水溶蚀为研究区吾松格尔组提供了优质储层发育的基础,其白云石化模式与蒸发浓缩高盐度海水有关,随着后期埋藏深度的增加,深埋藏环境下次生溶蚀孔隙的发育是优质储层形成和保持的关键。

#### 参考文献

- [1] SUN S Q. A reappraisal of dolomite abundance and occurrence in the Phanerozoic[J]. *Journal of sedimentary research*, 1994, 64(2a): 396-404.
- [2] ADAMS J E, RHODES M L. Dolomitization by seepage refluxion[J]. *AAPG bulletin*, 1960, 44(12): 1912-1920.
- [3] BADIOZAMANI K. The dorag dolomitization model, application to the middle Ordovician of Wisconsin[J]. *Journal of sedimentary research*, 1973, 43(4): 965-984.
- [4] MATTES B W, MOUNTJOY E W. Burial dolomitization of the Upper Devonian Miette Buildup, Jasper National Park, Alberta [M]//ZINGER D H, DUNHAM J B, ETHINGTON R L. Concepts and models of dolomitization. Houston, Texas: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1980.
- [5] DAVIES G R, SMITH JR L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview[J]. *AAPG bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [6] 杨海军,陈永权,田军,等.塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(2): 62-72.  
YANG Haijun, CHEN Yongquan, TIAN Jun, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in Well Luntan-1 of the Tarim Basin[J]. *China petroleum exploration*, 2020, 25(2): 62-72.
- [7] 刘存革,李国蓉,罗鹏,等.塔里木盆地北部寒武系大型进积型台地:斜坡地震层序、演化与控制因素[J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 669-687.  
LIU Cunge, LI Guorong, LUO Peng, et al. Seismic sequences, evolution and control factors of large Cambrian progradational platform-slope system in the Northern Tarim Basin, Northwest China[J]. *Acta geologica sinica*, 2016, 90(4): 669-687.
- [8] 沈安江,张友,冯子辉,等.塔东古城地区碳酸盐岩储层地质认识与勘探领域[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 96-106.  
SHEN Anjiang, ZHANG You, FENG Zihui, et al. Geological understandings and exploration prospects of carbonate reservoirs in Gucheng area, Tadong, Tarim Basin[J]. *China petroleum exploration*, 2020, 25(3): 96-106.
- [9] 朱永进,郑剑锋,刘玲利,等.塔里木盆地寒武统吾松格尔组沉积期岩相古地理与勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(1): 1-12.  
ZHU Yongjin, ZHENG Jianfeng, LIU Lingli, et al. Lithofacies paleogeography and exploration significance of Lower Cambrian Wusongger Formation depositional stage, Tarim Basin, NW China[J]. *Natural gas geoscience*, 2022, 33(1): 1-12.
- [10] 张天付,黄理力,倪新锋,等.塔里木盆地柯坪地区寒武统吾松格尔组岩性组合及其成因和勘探意义:亚洲第一深井轮探1井突破的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 928-940.  
ZHANG Tianfu, HUANG Lili, NI Xinfeng, et al. Lithological combination, genesis and exploration significance of the Lower Cambrian Wusongger Formation of Kalpin area in Tarim Basin: insight through the deepest Asian onshore well-Well Luntan 1[J]. *Oil & gas geology*, 2020, 41(5): 928-940.
- [11] 何登发,贾承造,李德生,等.塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 64-77.  
HE Dengfa, JIA Chengzao, LI Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2005, 26(1): 64-77.
- [12] 李清瑶,白忠凯,吕修祥,等.塔里木盆地柯坪冲断带储层研究[J]. *中国矿业*, 2016, 25(增刊1): 320-326.  
LI Qingyao, BAI Zhongkai, LÜ Xiuxiang, et al. The reservoir research in Kalpin thrust belt, Tarim Basin[J]. *China mining magazine*, 2016, 25(S1): 320-326.
- [13] 刘晔,柳小明,胡兆初,等. ICP-MS测定地质样品中37个元素的准确度和长期稳定性分析[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 1203-1210.  
LIU Ye, LIU Xiaoming, HU Zhaochu, et al. Evaluation of accuracy and long-term stability of determination of 37 trace elements in geological samples by ICP-MS[J]. *Acta petrologica sinica*, 2007, 23(5): 1203-1210.
- [14] ZHOU Feiyang, HE Dong, MIAO Xin, et al. Development of an automatic column chromatography separation device for metal isotope analysis based on droplet counting[J]. *Analytical chemistry*, 2021, 93(19): 7196-7203.
- [15] 余新亚,李平平,邹华耀,等.川北元坝气田二叠系长兴组白云岩稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. *古地理学报*, 2015, 17(3): 309-320.  
YU Xinya, LI Pingping, ZOU Huayao, et al. Rare earth element geochemistry of dolostones and its indicative significance of the Permian Changxing Formation in Yuanba Gas-

- field, northern Sichuan Basin [J]. *Journal of palaeogeography*, 2015, 17(3): 309–320.
- [16] BAI OUMY H, LEHMANN B. Anomalous enrichment of redox-sensitive trace elements in the marine black shales from the Duwi Formation, Egypt: evidence for the Late Cretaceous Tethys anoxia [J]. *Journal of African earth sciences*, 2017, 133: 7–14.
- [17] WIGNALL P B, TWITCHETT R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155–1158.
- [18] CALVERT S E, PEDERSEN T F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record [J]. *Marine geology*, 1993, 113(1/2): 67–88.
- [19] ALGEO T J, MAYNARD J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. *Chemical geology*, 2004, 206(3/4): 289–318.
- [20] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical geology*, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [21] 倪善芹, 侯泉林, 王安建, 等. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义: 以北京下古生界碳酸盐岩为例 [J]. *地质学报*, 2010, 84(10): 1510–1516.
- NI Shanqin, HOU Quanlin, WANG Anjian, et al. Geochemical characteristics of carbonate rocks and its geological implications: taking the Lower palaeozoic carbonate rock of Beijing area as an example [J]. *Acta geologica sinica*, 2010, 84(10): 1510–1516.
- [22] ALAGARSAMY R, YOU C F, NATH B N, et al. Determination of rare earth, major and trace elements in authigenic fraction of Andaman Sea (Northeastern Indian Ocean) sediments by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Microchemical journal*, 2010, 94(1): 90–97.
- [23] GREEN D G, MOUNTJOY E W. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta Deep Basin [J]. *Bulletin of Canadian petroleum geology*, 2005, 53(2): 101–129.
- [24] BANNER J L, HANSON G N, MEYERS W J. Rare earth element and Nd isotopic variations in regionally extensive dolomites from the Burlington-Keokuk Formation (Mississippian); implications for REE mobility during carbonate diagenesis [J]. *Journal of sedimentary research*, 1988, 58(3): 415–432.
- [25] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 810–818.
- HU Wenxuan, CHEN Qi, WANG Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs [J]. *Oil & gas geology*, 2010, 31(6): 810–818.
- [26] KAWABE I, TORIUMI T, OHTA A, et al. Monoisotopic REE abundances in seawater and the origin of seawater tetrad effect [J]. *Geochemical journal*, 1998, 32(4): 213–229.
- [27] QING Hairuo, MOUNTJOY E W. Rare earth element geochemistry of dolomites in the Middle Devonian Presqu'île barrier, Western Canada Sedimentary Basin: implications for fluid-rock ratios during dolomitization [J]. *Sedimentology*, 1994, 41(4): 787–804.
- [28] NOTHDURFT L D, WEBB G E, KAMBER B S. Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia: confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2004, 68(2): 263–283.
- [29] WEBB G E, KAMBER B S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: a new shallow seawater proxy [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2000, 64(9): 1557–1565.
- [30] 范青青, 卢双舫, 李文浩, 等. 中下寒武统海相地层地球化学特征及油气地质意义: 以塔里木盆地柯坪地区为例 [J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(2): 377–394.
- FAN Qingqing, LU Shuangfang, LI Wenhao, et al. Geochemical characteristics and geological significance for petroleum of the Middle-Lower Cambrian marine strata: a case study of Keping area in the Tarim Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(2): 377–394.
- [31] 陈荣坤. 稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用 [J]. *沉积学报*, 1994, 12(4): 11–21.
- CHEN Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 1994, 12(4): 11–21.
- [32] 桑树勋, 郑永飞, 张华, 等. 徐州地区下古生界碳酸盐岩的碳、氧同位素研究 [Z]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- SANG Shuxun, ZHENG Yongfei, ZHANG Hua, et al. Researches on carbon and oxygen stable isotopes of Lower Palaeozoic carbonates in Xuzhou area [Z]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [33] DERRY L A, KAUFMAN A J, JACOBSEN S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: evidence from stable and radiogenic isotopes [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1992, 56(3): 1317–1329.
- [34] KAUFMAN A J, JACOBSEN S B, KNOLL A H. The vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate [J]. *Earth and planetary science letters*, 1993, 120(3/4): 409–430.
- [35] 陈梅, 王龙樟, 张雄, 等. C、O 同位素在川东北碳酸盐岩储层研究中的应用 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 217–225.
- CHEN Mei, WANG Longzhang, ZHANG Xiong, et al. Application of carbon and oxygen isotope to carbonate reservoirs in Northeast Sichuan Basin [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2011, 29(2): 217–225.
- [36] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1964, 28(10/11): 1787–1816.
- [37] MCARTHUR J M, BURNETT J, HANCOCK J M. Strontium isotopes at K/T boundary [J]. *Nature*, 1992, 355: 28.
- [38] ELDERFIELD H. Strontium isotope stratigraphy [J]. *Palaeo-*

- geography, palaeoclimatology, palaeoecology, 1986, 57(1): 71–90.
- [39] 王利超, 胡文瑄, 王小林, 等. 白云岩化过程中铈含量变化及铈同位素分馏特征与意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 464–472.
- WANG Lichao, HU Wenxuan, WANG Xiaolin, et al. Variation of Sr content and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotope fractionation during dolomitization and their implications [J]. Oil & gas geology, 2016, 37(4): 464–472.
- [40] DENISON R E, KOEPNICK R B, BURKE W H, et al. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  curve[J]. Chemical geology, 1998, 152(3/4): 325–340.
- [41] 倪新锋, 陈永权, 王永生, 等. 塔里木盆地轮南地区深层寒武系台缘带新认识及盐下勘探区带: 基于岩石学、同位素对比及地震相的新证据[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 289–302.
- NI Xinfeng, CHEN Yongquan, WANG Yongsheng, et al. Recognition of platform margin and subsalt exploration prospect of deep-buried Cambrian in Lunnan area of Tarim Basin, Northwest China: new understanding based on evidence of petrology, isotope comparison and seismic facies[J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(4): 289–302.
- [42] 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 340–349.
- SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, CHEN Yongquan, et al. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(3): 340–349.

编辑:黄革萍

## Geochemical characteristics, genesis and evolution of dolomite of the Lower Cambrian Wusonggeer Formation in Keping area, Tarim Basin

NAN Hangyu, ZHANG Tianfu, XIE Shuyun, ZHOU Yue, KUANG Zhiwei, MA Jiayi

**Abstract:** The discovery in the Wusonggeer Formation as a potential new layer for risk exploration in the Cambrian subsalt dolomite field is a significant breakthrough in Tarim Basin. Understanding the genesis and evolution of dolomite is crucial for the formation, preservation, and evaluation of high-quality carbonate reservoirs. This study focus on the outcrops of Wusonggeer Formation in the Keping area. By analyzing the geochemical characteristics including trace element content, rare earth element content, and carbon and oxygen isotopes composition of the Wusonggeer Formation's dolomite, origin of dolomitization and source of dolomitized fluids in the study area were discussed, and possible dolomite patterns were explored. It is shown that the dolomites in the study area have formed in a sedimentary environment characterized by arid and hot climates, saline seawater, and oxidation. The relatively low  $\Sigma\text{REE}$  value (5.51–89.10  $\mu\text{g/g}$ , with an average value of 27.32  $\mu\text{g/g}$ ) and obvious low negative value of  $\delta^{13}\text{C}$  (from  $-3.14\text{‰}$  to  $-0.73\text{‰}$ ), and the high negative value of  $\delta^{18}\text{O}$  (from  $-10.45\text{‰}$  to  $-6.19\text{‰}$ ) indicates that the diagenesis process was significantly affected by the leaching of atmospheric fresh water. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value and REE distribution patterns of the dolomite are similar to those of dolomite originating from seawater, and the salinity index ( $Z$ ) of the dolomite is higher than that of normal seawater. Therefore, it is inferred that the dolomite fluid mainly comes from high salinity seawater. This study provides important insights into the formation mechanism of dolomite reservoirs and the prediction of high-quality reservoirs in the study area.

**Key words:** dolomite; geochemical characteristics; genetic pattern; Wusonggeer Formation; Keping area; Tarim Basin

**NAN Hangyu**, First author: Master candidate at School of Earth Science of China University of Geosciences (Wuhan), major in geochemistry, mainly engaged in dissolution kinetics of carbonate reservoirs. Add: No. 388 Lumo Rd., Guanshan Street, Hongshan District, Wuhan, Hubei 430074, China

**XIE Shuyun**, Corresponding author: Professor, major in geochemistry, mainly engaged in scientific research related to dissolution kinetics of carbonate reservoirs and geochemical prospecting and quantitative geochemistry in the coverage area. Add: No. 388 Lumo Rd., Guanshan Street, Hongshan District, Wuhan, Hubei 430074, China