

四川盆地东部下寒武统龙王庙组白云岩类型及其成因

孙海涛¹, 张玉银², 柳慧林³, 谢瑞¹, 杨雪琪¹, 任影¹

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 河北省地球物理勘查院, 河北廊坊 065000]

摘要:通过对四川盆地东部板凳沟剖面龙王庙组露头进行了密集采样(1块/m),并根据X-衍射得到的白云石含量对样品进行筛选后,结合主微量元素、稀土元素及碳、氧同位素测试结果,系统分析了该地区白云岩的类型及其成因。分析结果表明,研究区发育两大类不同成因的白云岩。一类发育有序度低的泥-粉晶白云石,具有正相关的MgO和CaO含量,Mg/Ca值总体较高,且低Sr含量,高Fe、Mn含量, $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 含量高, δEu 和 δCe 负异常明显, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值与同期海水形成的灰岩特征一致,发育于蒸发环境,为准同生的萨布哈白云石化作用和回流渗透白云石化作用的结果,且受到陆源碎屑混入的影响。而另一类发育粉-细晶白云石,MgO和CaO含量呈负相关,具有低Mg/Ca,高Sr、Fe、Mn含量,低 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 含量,也同样具 δEu 与 δCe 负异常以及同期正常海水形成的灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值,但 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值略低于同期海水形成的灰岩,这类白云石是浅埋藏白云石化作用形成的。结合白云岩的岩石学特征,认为研究区寒武系龙王庙组灰岩在沉积时,经历了准同生白云石化作用(包括萨布哈白云石化作用和回流渗透白云石化作用),晚期叠加了浅埋藏白云石化作用,因此表现出的碳-氧同位素数据具有分区性。

关键词:稀土元素;碳氧同位素;白云岩;龙王庙组;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Typological analysis and genetic mechanism of dolomite in the lower Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin

Sun Haitao¹, Zhang Yuyin², Liu Huilin³, Xie Rui¹, Yang Xueqi¹, Ren Ying¹

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;
3. Geophysical Exploration Academy of Hebei Province, Langfang, Hebei 065000, China]

Abstract: The dense sampling of the dolomite from the Bandenggou outcrop of Longwangmiao Formation in the eastern Sichuan Basin was carried out with the samples selected through X-ray diffraction. The classification and genesis of the dolomite were demonstrated based on test results such as major and trace elements, rare earth elements (REEs) and carbon and oxygen isotopes. The results show that the dolomitization of the study area could be divided into two types in terms of origins. One is the micritic dolomite with low order degree, which developed in evaporating environment and was influenced by para-syngenetic Sabkha dolomitization, seepage-reflux dolomitization, and terrigenous clastic minerals. For this kind of dolomite, MgO and CaO contents are positively correlated, and Mg/Ca ratio is high in general, with low content of Sr, high content of Fe, Mn and REE + Y, and significant δEu & δCe negative anomalies. Additionally, the $\delta^{13}\text{C}$ & $\delta^{18}\text{O}$ values are consistent with those of the limestone deposited in coeval sea water. The other is the powder fine crystal dolomite, formed by shallow burial dolomitization, with negatively correlated MgO and CaO content, low Mg/Ca value, high content of Sr, Fe and Mn, low content of REE + Y, δEu & δCe negative anomalies, and the same $\delta^{13}\text{C}$ value of the limestone deposited in coeval sea water. However, the value of $\delta^{18}\text{O}$ is a little bit lower than that of the limestone in coeval sea water. According to the petrographic characteristics of the dolomite, we believe that the rock has undergone the syndepositional dolomitization (including Sabkha effect and reflux infiltration) superimposed by shallow burial dolomitization at later time. As a result, the values of carbon and oxygen isotopes became different through the processes.

收稿日期:2018-01-05;修订日期:2018-02-08。

第一作者简介:孙海涛(1985—),男,讲师,沉积岩石学。E-mail:haitao.sun@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-004-001);国家自然科学基金项目(41302108)。

Key words: REE, carbon and oxygen isotopes, dolomite, Longwangmiao Formation, Sichuan Basin

寒武系龙王庙组碳酸盐岩孔隙型储层于2005年在威远构造获工业气流之后^[1],开始逐渐引起石油地质学家的广泛关注。2012年在川中磨溪-高石梯地区获得突破,寒武系龙王庙组再次成为四川盆地川中地区天然气勘探的重点层位之一^[2-3]。

前人通过大量勘探资料分析,对龙王庙组的地层、沉积、储层和油气成藏等方面开展过大量研究^[4-13],基本明确了龙王庙组的地层特征、沉积相带和成藏模式,认为龙王庙组沉积时期具有碳酸盐岩潮坪或碳酸盐岩缓坡沉积背景。与其他海相碳酸盐岩储层不同的是,龙王庙组各类沉积环境下白云岩中的原生孔隙和次生孔隙为主要的储集空间,既包括粒间溶孔和粒内溶孔,也包括晶间溶孔和晶间孔^[11-12,14-16]。对于龙王庙组白云岩的成因,多数学者也认为其与其他海相碳酸盐岩储层有所差异,但目前尚没有一个关于四川盆地各地区龙王庙组白云岩化过程的统一认识^[17-22]。既有人认为是准同生白云石化作用,也有人认为是混合水白云石化作用,还有人认为是埋藏白云石化作用。另外,目前的研究成果和手段比较单一,多是通过白云岩的岩石学特征及其岩相古地理特征或比较少量的主微量元素及碳氧同位素分析测试结果推断出模式。而且,研究区多集中在四川盆地中部和南部等地区,对于四川盆地东部龙王庙组的研究较少^[15,21-24],这可能是由于龙王庙组完整地层露头较少。应该说,白云石化作用是形成碳酸盐岩储层的一个关键而复杂的问题^[25],不同类型的白云石化作用除了与沉积环境有关^[11,18,26],还体现在白云岩的地球化学特征上,例如碳-氧同位素、主微量元素和稀土元素等方面^[13,27-37]。

本次研究以四川盆地东部地区出露比较完整的板凳沟剖面中龙王庙组为研究对象,通过系统密集采集白云岩样品,在岩石学特征研究的基础上,从地球化学特征方面分析了不同类型白云岩的主微量元素、稀土元素和碳-氧同位素的差异,结合区域沉积背景和沉积演化,对研究区白云岩的成因以及白云石化作用意义进行深入地探讨。

1 区域地质背景

研究区位于四川盆地东部地区(图1),地理位置位于现今重庆-达州境内。构造位置属于川东高陡构造带,北至大巴山,西至华蓥山,东至七跃山,南至南川-

开隆一带^[38],面积约26 000 km²。

震旦纪末期,桐湾运动导致扬子地台抬升,之后扬子地台沉降接受了寒武系沉积。早寒武世时期,整个扬子地台的构造活动趋于平静,盆地的沉积充填也趋于稳定,下寒武统筇竹寺组和沧浪铺组各发育了一套浅海陆棚碎屑岩沉积。碎屑岩沉积的“填平补齐”之后,四川盆地的地势整体上趋于平坦,此时的构造格局为西北高、南东低^[39],奠定了龙王庙组沉积时的古地貌背景。龙王庙组沉积时期,四川盆地处于温暖-炎热的亚热带气候环境^[40],局部地区发育蒸发环境,并且继承了西高东低的古地貌,水动力条件较强,发育了不同类型的碳酸盐岩沉积物^[4]。其中包括白云岩和灰岩两大岩类,既有台地相沉积,也有颗粒滩相沉积(图1)。形成的主要岩石类型包括泥(微)晶白云岩、颗粒白云岩、云质灰岩、鲕粒灰岩、砂屑灰岩和泥晶灰岩等,局部发育大套膏岩、云质膏岩及碳酸盐岩与碎屑岩的混合沉积。

2 样品测试方法

本次研究的样品均来自研究区内的板凳沟剖面,该剖面位于重庆市石柱县(图1)。板凳沟的寒武系龙王庙组剖面厚度约为90m(图2),本次研究中在板凳沟剖面,自下而上共采集碳酸盐岩样品83块,采样间隔为1.0~1.2m。

为了避开岩石明显的风化蚀变和方解石脉,所有样品均采自新鲜露头。回到室内挑选后,所有样品都进行了薄片鉴定、全岩X衍射分析和阴极发光分析,以准确识别样品的岩石类型并开展岩石学特征研究。为了在镜下区分碳酸盐矿物类型,所有普通薄片均经茜素红染色,使用Olympus Microscope BH-2光学显微镜进行鉴定。根据标准SY/T 5163—2010,利用Bruker D2 PHASER X-射线衍射仪开展了全岩X-射线衍射定量分析,测试时管压为30 kV、管流为10 mA,扫描速度为2°(2 θ)/min,采样步宽为4.5°(2 θ)。阴极发光分析主要利用CL 8200-MK5阴极发光仪(配以Leica偏光显微镜)进行,束电压15 kV,束电流400 μ A,真空度0.003 mBar,所有样品均采用相同测试条件以进行对比。

利用薄片鉴定和X-衍射分析结果,根据白云石含量大于50%,镁钙比大于0.125的标准,筛选出22块发生明显白云石化的样品(图2)。采用微钻技术对这22块样品的局部区域进行微区取样,保证微区样品

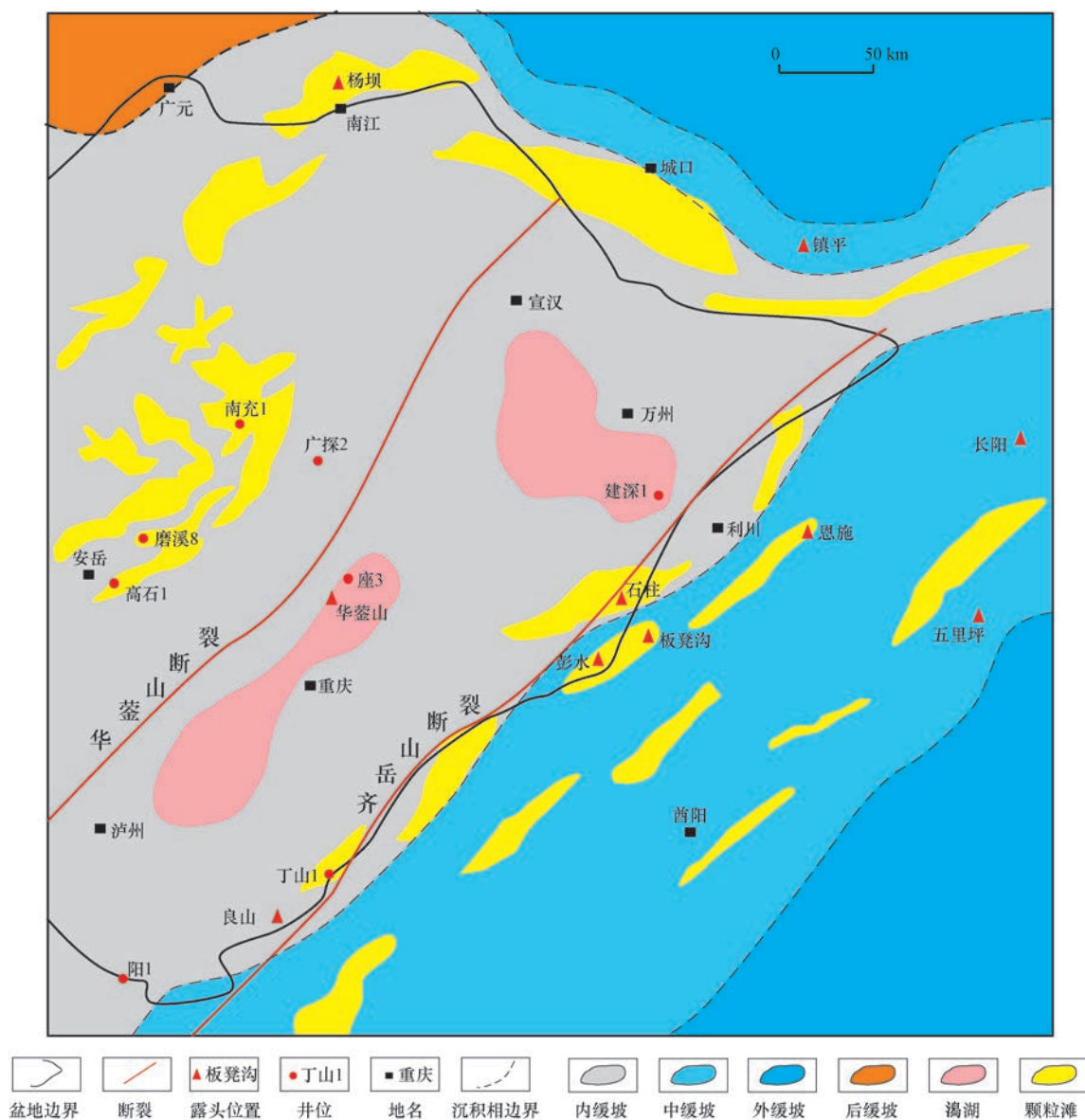


图 1 研究区位置及沉积相(据周进高等,2015 修改)

Fig. 1 Location of the study area and its sedimentary facies map (modified from Gao Jin et al., 2015)

是白云石的同时将其粉碎研磨至 200 目以下,并分别开展主、微量元素和碳-氧同位素分析。主、微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元素测试仪器为飞利浦 PW2404 X-射线荧光光谱仪,测试方法依据 GB/T 14506.28—2010《硅酸盐岩石化学分析方法》X-射线荧光光谱仪法测定主、微量元素。微量元素及稀土元素测试仪器为 Element XR 电感耦合等离子 ICP-MS 质谱仪,测试依据采用 GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法》第 30 部分:44 个元素量测定,测试温度为 20℃,相对湿度 30%。碳-氧同位素分析在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成,采用 McCrea 正磷酸法,样品与无水磷酸在 25℃的环境中反应 24h,测试仪

器为 Finnigan-MAT 252 气体同位素质谱仪,碳-氧同位素均采用 VPDB 标准,工作标样为 GBW04405,分析误差为 $\pm 0.1\%$ 。

3 岩石学特征

根据茜素红染色后的岩石薄片以及阴极发光薄片的镜下特征,从岩相学的角度出发,根据晶体大小识别出两种类型的白云石,分别是泥-粉晶白云石和粉-细晶白云石,具体特征如下。

3.1 泥-粉晶白云石

这类白云石主要发育在比较纯的泥晶白云岩或颗

粒白云岩中(图 2a,b),粒度非常小,显微镜下的晶体大小普遍不超过 0.01 mm(图 2d),偶见较大的粉晶白云石。有的样品保留了原生的颗粒结构(图 2e),颗粒内部被泥晶白云石充填。该类白云石的阴极发光特征为不发光—发昏暗红光,少数发暗红光(图 2g),有些颗粒内部的泥晶白云石也发红光(图 2h)。此外,除了白云石外,该类岩石中还常常伴生少量(不超过 10%)石英、长石或云母等碎屑矿物,露头上也可见伴生的石膏及泥质条带。

3.2 粉—细晶白云石

这类白云石的分布比较广泛,在颗粒白云岩或者灰质白云岩中都有发育(图 2c,f)。主要为粉晶白云石,晶体大小约为 0.01~0.1 mm,以自形—半自形为主;部分可达细晶甚至中晶级别,晶体大小介于 0.1~0.4 mm(图 2k),呈自形—半自形。此类白云石的产状有 3 种。第一种常发育缝合线附近,该缝合线也作为灰岩和白云岩的岩性界面,界面一侧为原始沉积的

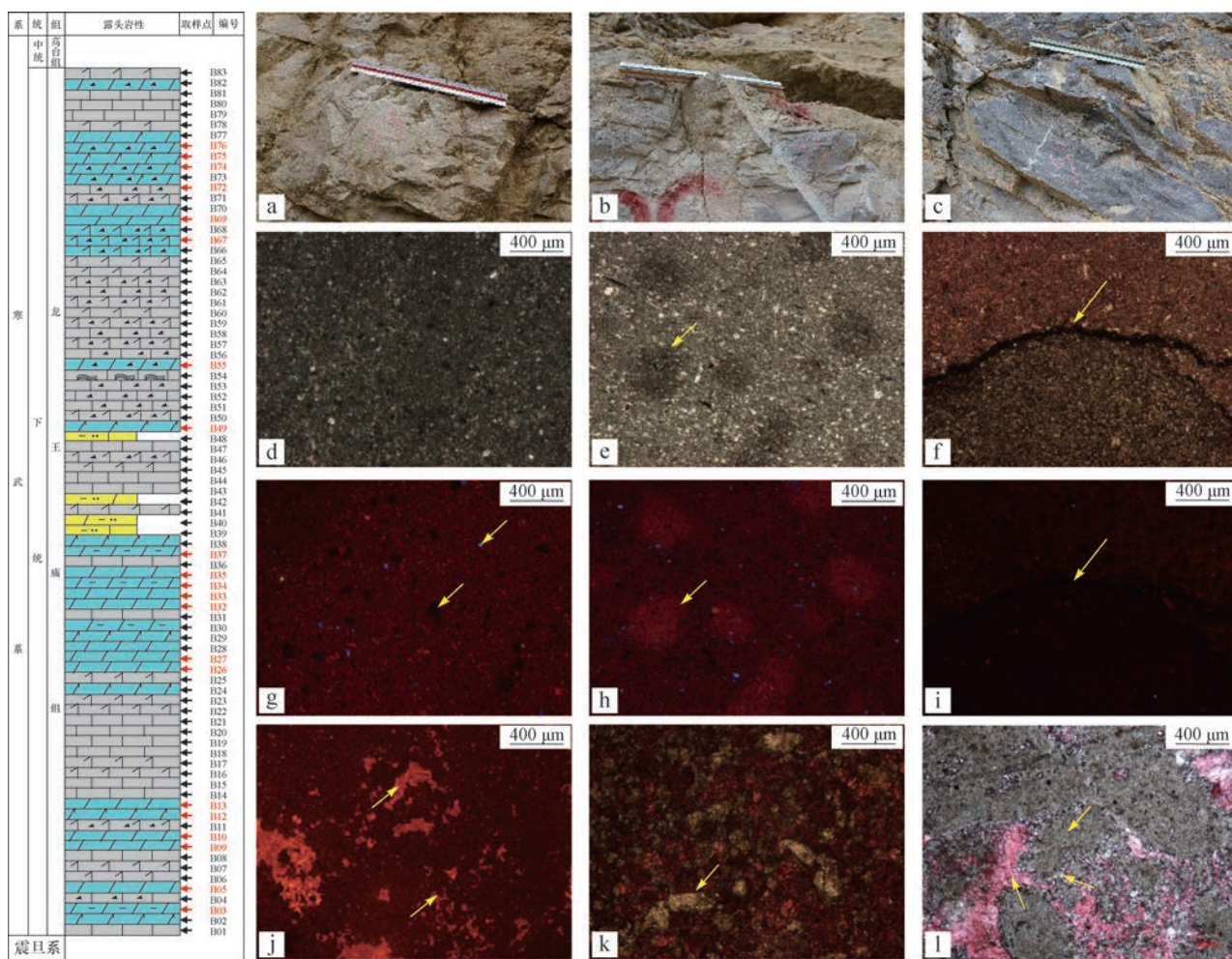


图2 四川盆地板凳沟露头岩性剖面及样品分布以及各类白云石镜下及阴极发光特征

Fig. 2 Lithologic profile and sample distribution of the Bandenggou outcrop, and the microscope and cathode luminescence characteristics of different dolomites

a. 样品 B26, 泥晶白云岩的露头特征, 浅灰色, 致密; b. 样品 B75, 颗粒白云岩的露头特征, 浅灰色, 略具有层理特征; c. 样品 B67, 残余灰质白云岩的露头特征, 灰色, 致密; d. 样品 B26, 泥晶白云岩的镜下特征, 含少量石英、长石碎屑, 正交偏光; e. 样品 B13, 泥晶白云岩的镜下特征, 见原始沉积的颗粒结构, 单偏光; f. 样品 B49, 灰质白云岩的镜下特征, 缝合线上部灰质部分染色变红, 缝合线下部白云质部分不变色, 单偏光; g. 样品 B26, 泥晶白云岩的阴极发光特征, 白云石呈暗红色, 石英和长石不发光或发蓝色光, 箭头所指为陆源碎屑颗粒; h. 样品 B13, 泥晶白云岩的阴极发光特征, 箭头所指的原始颗粒白云石化后呈红色, 基质白云石化后呈暗红色; i. 样品 B40, 灰质白云岩的阴极发光特征, 箭头所指为缝合线, 灰质部分发暗红色, 白云质部分不发光; j. 样品 B38, 细晶白云岩的阴极发光特征, 箭头所指白云石呈菱形, 发暗红色光, 白云石晶体周围充填了亮晶方解石, 发橘红色光; k. 样品 B67, 粉晶白云岩的镜下特征, 染色后变红的为残余灰质部分, 未变色的为白云质部分, 箭头所指的白云石颗粒较粗, 单偏光; l. 样品 B74, 泥晶白云岩的镜下特征, 可见箭头所指的原始沉积的颗粒已经全部泥晶白云石化, 颗粒边缘发育一些粉晶白云石, 颗粒之间充填了染色后变红的亮晶方解石, 单偏光。

灰岩,界面另一侧为白云石化形成的白云岩(图2i);第二种是呈分散状发育在残余的灰质成分之间的中晶白云石,晶体呈自形-半自形(图2j,k);第三种是形成在早期的泥晶白云石碎屑组成的颗粒周围,呈半自形的细晶白云石,不规则的排列在颗粒周边或者颗粒之间(图2l)。粉-细晶白云石的晶体表面通常较脏(图2k),少数细-中晶白云石略具雾心亮边结构特征,发暗红光-红光(图2j);白云石晶体之间常见亮晶方解石充填,发亮红色-橘红色光(图2j-l)。

4 地球化学特征

4.1 主量元素特征

对筛选后的白云岩样品进行碎样并测定其全岩的主、微量元素,结果见表1。主量元素数据的详细分析结果表明(图3),研究区泥-粉晶白云岩的CaO含量

变化范围是15.50%~38.74%,平均值为25.6%,而MgO含量为10.7%~19.8%,平均值为16.4%,CaO含量和MgO含量呈正相关;Mg/Ca比值较高,介于0.64~1.14,平均值为0.94。同时,泥-粉晶白云岩也具有高Al₂O₃含量(平均值为3.39%)和高SiO₂含量(平均值为14.47%)的特征(表1)。相对而言,粉-细晶白云岩则含有较高的CaO含量(35.82%~42.62%,平均值为39.78%)和相对较低的MgO含量(10.56%~12.24%,平均值为11.32%),且二者具有负相性;Mg/Ca比值变化范围小,为0.34~0.84,平均值为0.5。粉-细晶白云岩的Al₂O₃含量和SiO₂含量不及泥-粉晶白云石的1/5。

4.2 微量元素特征

微量元素的含量是碳酸盐岩成岩环境及成岩作用阶段划分的重要指标之一。前人研究表明随着埋藏深度增加,碳酸盐岩中Fe、Mn含量逐渐增高^[41]。

表1 四川盆地板凳沟剖面龙王庙组白云岩的主量元素和微量元素含量统计

Table 1 Major and trace elements' content of the dolomites in Longwangmiao Formation of Bandenggou outcrop

样品组	样品号	岩性	主量元素含量/%				微量元素含量/10 ⁻⁶				元素含量比		
			CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Sr	Na	Fe	Mn	Mg/Ca	Sr/Ca	Fe/Mn
泥-粉晶白云石	B3	泥晶白云岩	15.50	10.74	10.82	30.40	97.50	2 908.10	38 399.50	851.90	0.96	0.40	44.34
	B5	泥晶白云岩	26.21	19.17	2.05	10.99	104.00	437.70	7 872.30	131.70	1.02	0.25	58.82
	B9	泥晶白云岩	27.90	18.25	1.28	8.23	90.20	1 646.90	11 458.60	123.90	0.91	0.21	90.97
	B10	泥晶白云岩	29.49	19.39	0.76	4.24	105.00	363.50	6 035.50	170.40	0.91	0.23	34.85
	B12	泥晶白云岩	23.86	10.92	4.57	26.17	69.10	6 431.90	14 257.70	193.60	0.64	0.19	72.44
	B13	泥晶白云岩	25.13	14.63	4.14	18.75	63.30	2 284.90	12 158.40	162.60	0.81	0.16	73.54
	B26	泥晶白云岩	26.91	17.53	1.79	9.75	102.00	6 995.80	13 120.60	286.60	0.91	0.24	45.04
	B27	泥晶白云岩	24.35	16.36	3.46	16.05	75.40	10 460.30	10 583.90	193.60	0.93	0.20	53.78
	B32	泥晶白云岩	22.58	18.57	4.46	18.36	80.10	393.20	11 108.70	216.80	1.14	0.23	50.40
	B33	泥晶白云岩	19.35	15.09	4.00	26.45	87.50	2 559.40	14 432.60	209.10	1.09	0.29	67.90
	B34	泥晶白云岩	22.64	16.97	4.37	16.72	97.10	897.70	14 170.20	209.10	1.04	0.27	66.67
	B35	泥晶白云岩	23.30	18.20	3.76	15.09	105.00	816.00	11 808.50	209.10	1.09	0.29	55.55
	B37	泥晶白云岩	25.45	17.01	2.97	10.33	98.70	541.60	23 092.20	418.20	0.93	0.25	54.32
	B69	泥晶白云岩	22.20	13.49	1.88	28.01	59.00	615.70	4 635.90	147.10	0.85	0.17	30.99
	B75	泥晶白云岩	29.56	19.76	0.55	4.67	93.00	237.40	3 936.20	108.40	0.93	0.20	35.71
	B74	泥晶白云岩	38.74	13.70	0.37	1.34	146.00	393.20	3 673.80	147.10	0.49	0.24	24.56
	B76	泥晶白云岩	31.84	19.21	0.25	0.48	106.00	356.10	14 520.10	449.20	0.84	0.21	31.80
	平均值		25.59	16.41	3.03	14.47	92.88	2 255.26	12 662.63	248.73	0.91	0.24	52.45
粉-细晶白云石	B49	粉细晶白云岩	35.82	12.24	1.66	5.30	164.00	2 626.20	11 196.20	247.80	0.48	0.29	44.44
	B55	粉细晶白云岩	42.62	10.56	0.41	0.75	157.00	237.40	3 498.80	123.90	0.34	0.24	27.78
	B67	粉细晶白云岩	42.13	10.73	0.51	2.16	96.70	185.50	3 148.90	100.70	0.35	0.15	30.77
	B72	粉细晶白云岩	38.54	11.74	0.66	5.71	128.00	274.50	5 948.00	178.10	0.42	0.21	32.85
	平均值		39.78	11.32	0.81	3.48	136.43	830.90	5 947.98	162.63	0.40	0.22	33.96

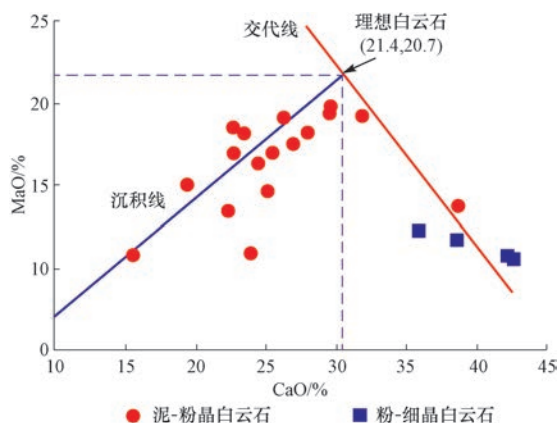


图3 四川盆地板凳沟露头龙王庙组白云岩 MgO 和 CaO 百分含量交会图

Fig. 3 The percentage cross-plot of the dolomites' MgO content and CaO content in Longwangmiao Formation of Bandenggou outcrop

研究区泥-粉晶白云岩中的 Fe, Mn 含量较高且分布范围较广, Fe 含量为 $(3\ 973.80 \sim 38\ 399.50) \times 10^{-6}$, 平均值为 $12\ 662.63 \times 10^{-6}$, Mn 含量为 $(108.40 \sim 851.90) \times 10^{-6}$, 平均值为 242.10×10^{-6} (表 1)。然而, 粉-细晶白云岩的 Fe, Mn 含量相对较低, Fe 含量为 $(3\ 148.9 \sim 24\ 666.6) \times 10^{-6}$, 平均值为 $9\ 521.8 \times 10^{-6}$, Mn 含量为 $(100.7 \sim 759.0) \times 10^{-6}$, 平均值为 286.6×10^{-6} (表 1)。

对白云岩 Sr 含量的测定也有助于了解白云石化流体的原始特征, 在白云石化及后期的成岩过程中会伴随有 Mg 的带入以及 Sr 的带出, 从而使得白云岩中的 Sr 含量明显降低。板凳沟剖面中两种类型白云石中 Sr 含量特征也不相同, 泥-粉晶白云石 Sr 含量值为 $(59.00 \sim 146.00) \times 10^{-6}$, 平均为 92.88×10^{-6} ; 粉-细晶白云岩的 Sr 含量略高, 为 $(96.70 \sim 164.00) \times 10^{-6}$, 平均值为 134.43×10^{-6} 。

4.3 碳-氧同位素特征

板凳沟剖面龙王庙组白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 分布范围虽然较广, 分布范围为 $-2.478\text{‰} \sim 1.462\text{‰}$, 平均值为 -0.719‰ (图 4; 表 2)。研究区不同类型白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素的分布范围差异较大, 泥-粉晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值较高, 平均值为 -6.24‰ ; 而粉-细晶白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值略低, 为 $-12.23\text{‰} \sim -7.94\text{‰}$ 。

根据 Jiang 等 (2016) 和 Veizer 等 (1999) 对早寒武统研究得出同时期海相腕足类化石的 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) 和 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 同位素值分别为 $-2.5\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ 与 $-10.0\text{‰} \sim -7.0\text{‰}$ [42-43] (图 4)。板凳沟剖面白云岩

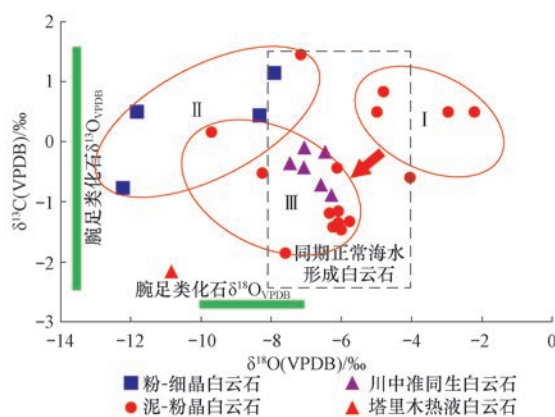


图4 四川盆地板凳沟露头龙王庙组白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值交会图 (腕足类化石数据参考 Jiang 等, 2016 和 Veizer 等, 1999)

Fig. 4 The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ value cross-plot of dolomites in Longwangmiao Formation of Bandenggou outcrop (referring to the brachiopodous fossils' data of Jiang et al., 2016 & Veizer et al., 1999)

的 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值均在同期海水腕足类化石的 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素分布区间之内。Land (1980) 和 Mckenzie (1981) 指出从同种流体中沉淀出的白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值比灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值约高 $2\text{‰} \sim 3\text{‰}$ [44-45], 因此推算出与早寒武统与灰岩同源流体形成的白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值约 $-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$, 如图所示, 大部分泥-粉晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 落在海水成因的白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值范围内, 而粉-细晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值低于此范围, 认为是由其他来源的流体所形成。

根据 Keith and Webber (1964) 的盐度指数计算公式: $Z(\text{盐度指数}) = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$ [46], 计算出板凳沟剖面白云岩的盐度指数整体较大, 高于 120。其中泥-粉晶白云岩的 Z 值高, 平均值为 123.0; 而粉-细晶白云岩的盐度指数略低, 平均为 122.9。此外, 根据白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值可以计算白云岩的形成温度 [46], 其计算公式为 $T = 13.85 - 4.54\delta^{18}\text{O} + 0.04(\delta^{18}\text{O})^2$, 计算出泥-粉晶白云岩的成岩温度为 $24.1 \sim 70.7\text{℃}$, 平均值为 43.9℃ , 温度范围波动较大; 粉-细晶白云岩的成岩温度为 $52.4 \sim 75.3\text{℃}$, 平均值为 63.9℃ , 明显高于泥-粉晶白云岩的形成温度, 且温度范围波动较小 (表 2)。

4.4 稀土元素特征

与正常海相碳酸盐岩的 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 含量 $(1 \sim 50) \times 10^{-6}$ 相比, 龙王庙组白云岩的总稀土元素含量相对较高 (表 3), 结合岩石学及微量元素特征认为, 应归因于陆源碎屑供给较为充足。研究区的 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 稀土元

表 2 四川盆地板凳沟剖面龙王庙组白云岩碳、氧同位素含量

Table 2 The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ content of the dolomite in Longwangmiao Formation of Bandenggou outcrop

样品组	样品号	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)/‰	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)/‰	形成温度/℃ ^[46]
泥-粉晶白云石	B3	0.836	-4.822	36.7
	B5	-1.832	-7.601	50.7
	B9	-0.520	-8.270	54.1
	B10	-1.331	-5.783	41.4
	B12	-1.465	-6.037	42.7
	B13	-0.585	-4.040	32.8
	B26	0.162	-9.732	61.8
	B27	-0.431	-6.146	43.3
	B32	-1.190	-6.397	44.5
	B33	-1.352	-6.133	43.2
	B34	-1.399	-6.246	43.8
	B35	-1.168	-6.155	43.3
	B37	-2.478	-11.384	70.7
	B69	1.462	-7.170	48.5
	B75	0.513	-2.968	27.7
	B74	0.516	-2.212	24.1
	B76	0.507	-5.002	37.6
	平均值	-0.570	-6.240	43.9
粉-细晶白云石	B49	-0.770	-12.228	75.3
	B55	0.500	-11.860	73.3
	B67	1.137	-7.937	52.4
	B72	0.417	-8.335	54.5
	平均值	0.320	-10.090	63.9

表 3 四川盆地板凳沟剖面龙王庙组白云岩的稀土元素含量及计算结果

Table 3 REE content of the dolomite in Longwangmiao Formation of Bandenggou outcrop

样品组	样品号	稀土元素含量/ 10^{-6}															$\Sigma\text{REE} + \text{Y}/10^{-6}$			δCe	δEu
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y					
泥-粉晶白云石	B3	16.00	26.50	3.28	10.70	1.83	0.35	1.56	0.28	1.39	0.30	0.92	0.18	1.06	0.16	7.86	72.37	0.73	0.99		
	B5	6.02	10.00	1.34	4.85	0.99	0.16	0.78	0.15	0.73	0.15	0.41	0.08	0.42	0.06	4.18	30.32	0.75	0.67		
	B9	3.82	7.23	0.97	3.54	0.76	0.15	0.61	0.12	0.61	0.12	0.35	0.07	0.36	0.05	3.52	22.28	0.75	0.74		
	B10	3.35	6.34	0.85	3.15	0.69	0.15	0.54	0.11	0.54	0.11	0.29	0.06	0.29	0.04	3.09	19.60	0.76	0.78		
	B12	17.10	31.60	4.44	17.00	3.56	0.59	3.03	0.61	3.11	0.61	1.60	0.26	1.37	0.19	18.50	103.57	0.75	1.08		
	B13	15.80	28.50	3.55	13.10	2.52	0.39	2.12	0.41	2.09	0.43	1.18	0.21	1.15	0.16	12.80	84.41	0.82	0.89		
	B26	5.45	10.90	1.56	6.13	1.38	0.20	1.14	0.24	1.17	0.23	0.60	0.10	0.54	0.08	6.79	36.51	0.76	0.67		
	B27	7.33	13.50	1.78	6.69	1.45	0.27	1.18	0.24	1.23	0.26	0.71	0.13	0.73	0.11	6.97	42.58	0.79	0.88		
	B32	16.90	31.00	3.75	13.10	2.28	0.33	1.80	0.32	1.52	0.32	0.94	0.17	1.00	0.14	8.95	82.52	0.80	0.81		
	B33	16.50	29.00	3.52	12.30	2.10	0.31	1.65	0.29	1.36	0.28	0.78	0.14	0.78	0.12	7.79	76.92	0.79	0.80		
	B34	13.40	23.70	2.91	10.40	1.92	0.30	1.50	0.28	1.38	0.28	0.80	0.14	0.82	0.12	8.08	66.03	0.80	0.82		
	B35	11.00	20.10	2.51	9.22	1.80	0.29	1.45	0.27	1.36	0.28	0.80	0.14	0.79	0.12	7.99	58.12	0.81	0.83		
	B37	13.30	24.70	3.10	11.70	2.63	0.58	2.24	0.47	2.38	0.47	1.22	0.21	1.12	0.16	13.10	77.38	0.83	1.29		
	B69	1.63	3.04	0.43	1.69	0.45	0.10	0.32	0.08	0.41	0.09	0.24	0.05	0.27	0.04	4.23	13.07	0.77	0.66		
	B75	1.77	3.39	0.46	1.71	0.37	0.08	0.25	0.05	0.27	0.06	0.15	0.03	0.17	0.03	1.50	10.29	0.76	0.61		
	B74	6.25	9.21	1.09	3.67	0.59	0.14	0.46	0.07	0.24	0.05	0.13	0.03	0.14	0.02	1.93	24.02	0.78	0.81		
	B76	2.48	6.17	1.00	4.11	1.02	0.16	0.64	0.13	0.66	0.13	0.32	0.06	0.29	0.04	3.05	20.26	0.70	0.66		
	平均值	9.30	16.76	2.15	7.83	1.55	0.27	1.25	0.24	1.20	0.25	0.67	0.12	0.66	0.10	7.08	49.43	0.77	0.82		
粉-细晶白云石	B49	6.53	9.37	1.16	4.04	0.77	0.17	0.58	0.10	0.49	0.10	0.26	0.05	0.26	0.04	2.98	26.90	0.78	0.83		
	B55	2.34	3.61	0.47	1.61	0.31	0.07	0.23	0.04	0.21	0.04	0.12	0.03	0.12	0.02	1.28	10.50	0.73	0.59		
	B67	2.60	3.92	0.48	1.65	0.33	0.07	0.25	0.05	0.23	0.05	0.12	0.03	0.13	0.02	1.35	11.28	0.77	0.56		
	B72	2.56	4.32	0.58	2.15	0.44	0.10	0.30	0.06	0.24	0.05	0.13	0.03	0.14	0.02	1.38	12.50	0.76	0.69		
	平均值	3.51	5.31	0.67	2.36	0.46	0.10	0.34	0.06	0.29	0.06	0.16	0.04	0.16	0.03	1.75	15.30	0.76	0.67		

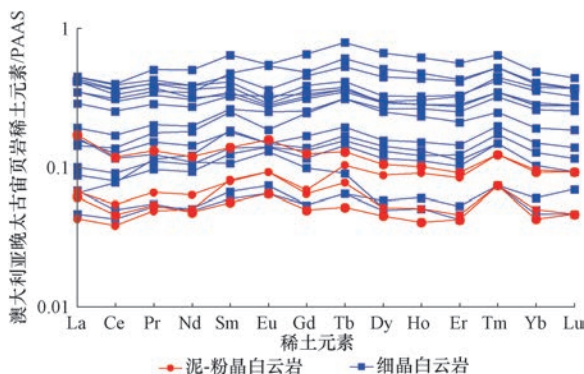


图5 四川盆地板凳沟露头龙王庙组白云岩
稀土元素太古宙页岩 (PAAS) 标准化配分模式

Fig. 5 PAAS-normalized REE patterns of diverse dolomites in
Longwangmiao Formation of Bandenggou outcrop

素含量变化范围较大,分布在 $(10.29 \sim 103.57) \times 10^{-6}$,其中泥-粉晶白云石的 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 含量平均值为 49.43×10^{-6} ,明显高于粉-细晶白云石的平均值 15.30×10^{-6} ,与正常海相碳酸盐岩的 $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ 含量 $(1 \sim 50) \times 10^{-6}$ 相比,泥-粉晶白云石的总稀土元素含量相对较高,而粉-细晶白云石稀土元素含量落在海水范围内,结合岩石学及微量元素特征认为,泥晶白云岩含量高应归因于受到陆源碎屑输入的影响。

将稀土元素数据用 Gromet (1984) 发表的后太古宙页岩进行标准化处理^[47],稀土元素配分模式如图5所示,整体上表现为平缓略向左倾的模式。此外,泥-粉晶白云石的 δCe 介于 $0.727 \sim 0.830$,平均值 0.777 ; δEu 介于 $0.610 \sim 1.291$,平均值为 0.835 。粉-细晶白云石的 δCe 介于 $0.699 \sim 0.792$,平均值约 0.759 ; δEu 介于 $0.564 \sim 1.084$,平均值为 0.748 。两种白云石都具有明显的 δEu 负异常和 δCe 负异常的特征,表明大部分白云石化流体与海水成因的碳酸盐岩特征相符^[48-49],少量白云石受到后期流体的影响表现出 Eu 正异常。

5 白云岩成因讨论

MgO 含量和 CaO 的含量的变化与白云石化作用类型有关。准同生期白云石化形成的白云岩, MgO/CaO 比值接近白云岩化学计量组成,且 CaO 含量与 MgO 含量同时增加;而埋藏交代成因的白云岩, MgO 含量则随着 Mg^{2+} 替换 Ca^{2+} 程度的增加而升高,故 CaO 含量随 MgO 增加而减少^[50-51]。因此,从主量元素含量特征出发,结合岩石学特征及其他地球化学数据,认为研究区泥-粉晶白云岩和粉-细晶白云岩具有不同的白云石化作用过程。

5.1 泥-粉晶白云岩是准同生白云石化作用的结果

研究区龙王庙组的泥-粉晶白云岩中, MgO 含量和 CaO 含量的平均值更接近于理想白云石的含量 ($21.4\% \text{ CaO}$ 和 $20.7\% \text{ MgO}$),且具有明显的正相关性,说明研究区泥-粉晶白云岩可能是准同生期白云石化成因。而且,研究区泥-粉晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值与同期海水成因的白云岩特征相近,稀土元素配分模式等与陈松等 (2013) 所测得寒武纪泥-粉晶灰岩特征也相近^[48],因此推断形成研究区泥-粉晶白云岩的流体应该为同期的寒武纪海水。

利用这类白云岩碳-氧同位素数值计算得到的盐度指数较高,平均值为 123 ,计算的成岩温度平均值为 43.9°C ,且范围波动较大 ($24.1 \sim 70.7^\circ\text{C}$),说明形成环境温度接近海水蒸发温度,且昼夜温差大,反映温暖-炎热的气候环境。而且,岩石露头中伴生石膏/硬石膏,也指示研究区泥-粉晶白云岩形成的时期,海水蒸发浓缩作用较强。因此,推断这类白云岩的流体来源是同期海水,蒸发环境引起海水浓缩提高了 Mg/Ca 比值,在较浅位置的泥晶方解石发生毛细管浓缩作用而白云石化,而较深位置的方解石接受海水渗透回流作用而白云石化,两种白云石化作用均为准同生期白云石化作用。

其次,这种低水位时期,从陆源间歇输入的碎屑矿物对白云岩的岩石学和地球化学特征造成了一定的影响。虽然研究区泥-粉晶白云岩中的 Fe 含量和 Mn 含量相关性较强,但这并非一定是在埋藏成岩过程中 Fe^{2+} , Mn^{2+} 进入到矿物晶格中导致其含量增加的,因为陆源碎屑的混入也能为白云岩沉积提供较高含量的 Fe , Mn 元素,而前文岩石学特征部分已经明确提出研究区泥-粉晶白云岩中混有陆源碎屑矿物。研究区泥-粉晶白云岩还具有较高的 Al_2O_3 含量和 SiO_2 含量,以及较高的稀土元素含量,都说明在沉积过程中受到陆源碎屑的影响。

因此,结合沉积背景、岩石学特征和地球化学特征认为,泥-粉晶白云岩是准同生期白云石化作用的结果,此时水体较浅,水动力较强,蒸发作用强,且受到少量陆源碎屑矿物的混入。

5.2 粉-细晶白云岩是埋藏白云石化作用的结果

首先,根据粉-细晶白云岩在显微镜下晶体较粗、表面较脏、且略具雾心亮边的结构特征,阴极发光下发暗红光-红光的特征,初步判断该白云石化作用形成在埋藏环境中。而且,这类白云石常呈分散状与方解

石共生,说明这类白云石化作用并不是十分全面和彻底,保留了残余灰质成分。而且,粉-细晶白云岩通常沿缝合线富集成斑块状,说明白云石化流体可能是沿着缝合线进入灰岩中,形成了鲜明的灰岩和白云岩的界面,这说明此时沉积物已经进入埋藏成岩阶段。同时,此类白云岩中未见明显的马鞍状白云石,可以排除热液成因。

其次,研究区粉-细晶白云岩的地球化学结果也显示埋藏白云石化作用的响应特征。从岩石学特征上可以看出粉-细晶白云岩中无陆源碎屑物加入,但其Fe和Mn元素含量也呈正相关性,这种Fe、Mn元素的富集也与埋藏成岩作用有关。利用同位素数值计算的粉-细晶白云岩的形成温度平均为63.9℃,温度较高,且波动范围不大,表明温度受季节和昼夜影响较小,可能为埋藏环境。前人研究表明四川盆地寒武统地层的古地温梯度约为30~35℃/km^[49],若地层表面的温度为25℃,计算粉-细晶白云岩发生白云岩化的深度约为1150~1350m,已经进入浅埋藏阶段。温度升高也影响到了粉-细晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值,远低于同期海水(图4),其数据分布与同期塔里木盆地热液白云石的数据特点也不一样^[51],也可以排除热液成因。

5.3 部分准同生白云石化作用的白云岩叠加了浅埋藏白云石化作用

根据前面对两类白云岩岩石学特征的讨论,可以发现,有个别颗粒白云岩中既有较细的泥晶白云石,也有较粗的粉-细晶白云石(图21),从岩石学角度解释认为其早期经历准同生白云石化作用,颗粒内充满了泥晶白云石,进而埋藏过程中叠加了浅埋藏白云石化作用,在粒间及颗粒边缘形成了粉晶和细晶白云石。

这种叠加作用也体现在稀土元素特征上,因为所有白云岩的稀土元素配分模式及稀土元素总量与同期海水沉积灰岩相似^[48],指示这些白云石化流体都保存了同期早寒武世的海水特征,也就是都经历了海水的影响。而且,叠加作用还导致了白云岩样品的碳-氧同位素数据出现了分区现象(图4)。从图中可以看出,本区浅埋藏白云石化形成的粉-细晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值范围是-12.23‰~-7.94‰, $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值都比较大,这些数据主要落在图中Ⅱ区。而准同生期白云石化作用形成的泥-粉晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值范围较广,从-10‰~-2.1‰都有分布,且 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值分布也范围广,从-2.478‰~1.462‰都有分布,我们认为这样的分布特征与两期白云石化

作用的叠加有关。可以看出,泥-粉晶白云石样品可以分为Ⅰ区和Ⅲ区两部分,落在Ⅰ区的数据只经历了准同生期白云石化作用,落在Ⅲ区的数据后期叠加了浅埋藏白云石化作用,这一数据特征与前人研究过得川中准同生白云石的数据区间是一致的(图4),川中准同生白云石也经历过浅埋藏白云石化作用的叠加,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值与本区叠加作用形成的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值相似^[9]。

因此,结合本区白云岩样品的碳-氧同位素数据分布的分区性,以及两期白云石化作用过程,认为准同生期白云石化作用形成的白云岩,其 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值在同期正常海水形成白云石的区间内, $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值均略高于同期正常海水形成白云石的区间或在区间上右上部,即Ⅰ区;而浅埋藏白云石化作用形成的白云岩,其 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值在同期正常海水形成白云石的区间内, $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值均小于同期正常海水形成白云石的区间,即Ⅱ区;而两期白云石化作用叠加形成的白云岩,受到埋藏白云石化流体的改造,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值均落在同期正常海水形成白云石的区间左下部或略小于该区间,即Ⅲ区。

6 结论

1) 根据茜素红染色后的岩石薄片以及阴极发光薄片的镜下特征,将板凳沟剖面寒武系龙王庙组白云石分为两种类型,分别是泥-粉晶白云石和粉-细晶白云石。泥-粉晶白云石分布在泥晶白云岩或颗粒白云岩中,粒度小,保留了原生的颗粒结构,伴生陆源碎屑矿物和石膏,阴极发光特征为不发光-发昏暗红光,少数发暗红光。粉-细晶白云石分布在颗粒白云岩或者灰质白云岩,晶体呈自形-半自形,具有3种产状,少数细-中晶白云石略具雾心亮边结构特征,发暗红光-红光。

2) 研究区的泥-粉细晶白云石有序度低,具有正相关的MgO和CaO含量,Mg/Ca值总体较高,且低Sr含量,高Fe和Mn含量, $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 含量高, δEu 和 δCe 负异常明显, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值与同期海水形成的灰岩特征一致。这类白云石受到蒸发环境下萨布哈白云石化作用和回流渗透白云石化作用的影响,也受到陆源碎屑混入的影响,是准同生白云石化作用的结果。

3) 研究区粉-细晶白云石的MgO含量和CaO含量呈负相关,具有低Mg/Ca比值,高Sr、Fe、Mn含量,低 $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ 含量,也同样具 δEu 与 δCe 负异常以及同期正常海水形成的灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值,但 $\delta^{18}\text{O}$ 同

位素值略微低于同期海水形成的灰岩特征。这类白云岩是晚期浅埋藏白云石化作用的结果。研究区个别样品具有两期白云石化作用叠加的结果,表现出的碳-氧同位素数据分布的分区性。

参 考 文 献

- [1] 马永生. 威远气田老井复查取得突破[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 360.
Ma Yongsheng. The breakthrough in the old well of the Wei yuan gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 360.
- [2] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268 - 277.
Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunhui, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. Petroleum exploration and Development, 2014, 41(3): 268 - 277.
- [3] 魏国齐, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 1 - 12.
Wei Guoqi, Du Jinhu, Xu Chunhui, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(1): 1 - 12.
- [4] 黄福喜, 陈洪德, 侯明才, 等. 中上扬子克拉通加里东期(寒武—志留纪)沉积层序充填过程与演化模式[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2299 - 2317.
Huang Fuxi, Chen Hongde, Hou Mingcai, et al. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian (Cambrian-Silurian) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2299 - 2317.
- [5] 李皎, 何登发. 四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造—沉积环境演化[J]. 古地理学报, 2014, 15(4): 441 - 460.
Li Jiao, He Dengfa. Paleogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Cambrian in Sichuan Basin and adjacent areas [J]. Journal of Paleogeography, 2014, 16(4): 441 - 460.
- [6] 李晓清, 汪泽成, 张兴为, 等. 四川盆地古隆起特征及对天然气的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 347 - 351.
Li Xiaoqing, Wang Zecheng, Zhang Xingwei, et al. Characteristics of paleo-uplifts in Sichuan Basin and their control action on natural gases [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 347 - 351.
- [7] 马永生, 陈洪德, 王国力. 中国南方层序地层与古地理[M]. 科学出版社, 2009: 480.
Ma Yongsheng, Chen Hongde, Wang Guoli. Sequence stratigraphy and palaeogeography in southern China [M]. Beijing: Science Press, 2009, 224 - 266.
- [8] 梅冥相, 张丛, 张海, 等. 上扬子区下寒武统的层序地层格架及其形成的古地理背景[J]. 现代地质, 2006, 20(2): 328 - 342.
Mei Mingxiang, Zhang Cong, Zhang Hai, et al. Sequence-stratigraphic framework and their forming backgrounds of Paleogeography for the Lower Cambrian of the Upper-Yangtze Region [J]. Geoscience, 2006, 20(2): 328 - 342.
- [9] 田艳红, 刘树根, 赵异华, 等. 四川盆地中部龙王庙组储层成岩作用[J]. 成都理工大学学报(自科版), 2014(6): 671 - 683.
Tian Yanhong, Liu Shugen, Zhao Yihua, et al. Diagenesis of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in central area of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 671 - 683.
- [10] 徐美娥, 张荣强, 彭勇民, 等. 四川盆地东南部中、下寒武统膏岩盖层分布特征及封盖有效性[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 301 - 306.
Xu Mei'e, Zhang Rongqiang, Peng Yongmin, et al. Distribution and sealing effectiveness of Middle-Lower Cambrian evaporite cap rocks in the southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 301 - 306.
- [11] 姚根顺, 周进高, 邹伟宏, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 1 - 8.
Yao Genshun, Zhou Jingao, Zou Caineng, et al. Characteristics and distribution rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beach in Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(4): 1 - 8.
- [12] 郑和荣. 中国前中生代构造层序—岩相古地理图集[M]. 地质出版社, 2010.
Zheng Herong. Tectonic and lithofacies paleogeographic atlases of pre-Mesozoic in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [13] 傅旭 H, 洪德 C, 明才 H, 等. 填充过程 and 演化模型 of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian (Cambrian-Silurian) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2299 - 2317.
- [14] 黄文明, 刘树根, 张长俊, 等. 四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 566 - 575.
Huang Wenming, Liu Shugen, Zhang Changjun, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the high quality Cambrian reservoirs in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 566 - 575.
- [15] 朱光有, 张水昌, 梁英波. 四川盆地深部海相优质储集层的形成机理及其分布预测[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 161 - 166.
Zhu Guangyou, Zhang Yongchang, Liang Yingbo. Formation mechanism and distribution prediction of high-quality marine reservoir in deeper Sichuan Basin [J]. Petroleum exploration and Development, 2006, 33(2): 161 - 166.
- [16] 任影, 钟大康, 高崇龙, 等. 川东及其周缘地区下寒武统龙王庙组储集层特征与控制因素[J]. 古地理学报, 2015, 17(6): 829 - 840.
Ren Ying, Zhong Dakang, Gao Chonglong, et al. Sedimentary facies of the lower Cambrian Longwangmiao Formation in Eastern Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. Journal of Paleogeography, 2015, 17(3): 335 - 346.
- [17] 李天生. 四川盆地寒武系沉积成岩特征与油气储集性[J]. 矿物岩石, 1992(3): 66 - 73.
Li Tiansheng. The characteristics of sedimentary rock and reservoir of oil and gas of Cambrian system in Sichuan Basin [J]. Journal of Mineralogy, 1992(3): 66 - 73.

- erology and Petrology, 1992, 12(3): 66–73.
- [18] 刘树根, 宋金民, 赵异华, 等. 四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014(6): 657–671.
- Liu Shugen, Song Jinmin, Zhao Yihua, et al. Controlling factors of formation and distribution of lower Cambrian Longwangmiao Formation high-quality reservoir in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 657–671.
- [19] 孟宪武, 朱兰, 王海军, 等. 川西南地区下寒武统龙王庙组储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015(2): 180–187.
- Meng Xianwu, Zhu Lan, Wang Haijun, et al. Characteristics of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoir in Southwest Sichuan, China Journal of Chengdu University of technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(2): 180–187.
- [20] 杨威, 谢武仁, 魏国齐, 等. 四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层展布与勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(s2): 21–34.
- Yang Wei, Xie Wuren, Wei Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography, favorable reservoir distribution and exploration zones of the Cambrian and Ordovician in Sichuan Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 33(2): 21–34.
- [21] 杨雪飞, 杨跃明, 李兴彦, 等. 川中地区下寒武统龙王庙组白云岩储层成岩作用[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 35–41.
- Yang Xuefei, Wang Xingzhi, Yang Yueming, et al. Diagenesis of dolomite reservoir in Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in central Sichuan Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(1): 35–41.
- [22] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158–166.
- Zhou Jingao, Xu Chunhui, Yao Genshun, et al. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 158–166.
- [23] 黄亮. 川东南坳陷带清虚洞组优质储层发育主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 508–513.
- Huang Liang. Major controlling factors of Cambrian Qingxudong Formation high-quality reservoir in downwarp-fold belt of southeast Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 508–513.
- [24] 李亚林, 巫芙蓉, 刘定锦, 等. 乐山—龙女寺古隆起龙王庙组储层分布规律及勘探前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 61–66.
- Li Yalin, Wu Furong, Liu Dingjin, et al. Distribution rule and exploration prospect of the Longwangmiao Formation reservoirs in the Leshan-Longnusi paleouplift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 61–66.
- [25] 赫云兰, 刘波, 秦善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(6): 1010–1020.
- He Yunlan, Liu Bo, Qin Shan. Study on the dolomitization and dolostone Genesis [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(6): 1010–1020.
- [26] 张学丰, 李晓峰, 李宗杰, 等. 白云岩的残余结构及其沉积相的意义——以塔中地区中—下奥陶统为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 722–728.
- Zhang Xuefeng, Li Xiaofeng, Li Zongjie, et al. Relict texture of dolostones and its significance to sedimentary facies: A case study from the Middle-Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 722–728.
- [27] Gregg J M, Bish D L, Kaczmarek S E, et al. Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: A review[J]. Sedimentology, 2015, 62(6): 1749–1769.
- [28] Li R. Petrography and geochemistry of the Permian-Triassic boundary interval, Yangou section, South China: Implications for early Griesbachian seawater $\delta^{13}\text{C}$ DIC gradient with depth[J]. Sedimentary Geology, 2017, 351.
- [29] Nader F H, Swennen R, Ellam R. Reflux stratabound dolostone and hydrothermal volcanism-associated dolostone: a two-stage dolomitization model (Jurassic, Lebanon) [J]. Sedimentology, 2004, 51(2): 339–360.
- [30] Olanipekun B J, Azmy K. In situ characterization of dolomite crystals: Evaluation of dolomitization process and its effect on zoning[J]. Sedimentology, 2017.
- [31] Rahimpour-Bonab H, Esrafil-Dizaji B, Tavakoli V. Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the south pars gasfield, offshore iran: Controls on reservoir quality[J]. Journal of Petroleum Geology, 2010, 33(1): 43–66.
- [32] 贺训云, 寿建峰, 沈安江, 等. 白云岩地球化学特征及成因——以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组合为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 375–384.
- He Xunyun, Shou Jianfeng, Shen Anjiang, et al. Geochemical characteristics and origin of the dolomite: A case study from the middle assemblage of Majiagou Formation Member 5th of the west of Jinbian Gas Field, Ordos Basin, North China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 375–384.
- [33] 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.
- [34] 江文剑, 侯明才, 邢凤存, 等. 川东南地区娄山关群白云岩稀土元素特征及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 473–482.
- Jiang Wenjian, Hou Mingcai, Xing Fengcun, et al. Characteristics and indications of rare earth elements in dolomite of the Cambrian Loushanguan Group, SE Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 473–482.
- [35] 王利超, 胡文瑄, 王小林, 等. 白云岩化过程中镭含量变化及镭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.
- [36] 曾理, 万茂霞, 彭英. 白云石有序度及其在石油地质中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2004, 27(4): 64–66.
- Zeng Li, Wan Maoxia, Peng Ying. Dolomite sequentiality and its application to petroleum geology [J]. Gas Exploration and Development, 2004, 27(4): 64–66.

- ment, 2004, 27(4): 64–66.
- [37] 强子同, 曾德铭, 王兴志, 等. 川东北下三叠统飞仙关组鲕粒滩白云岩同位素地球化学特征[J]. 古地理论, 2012, 14(1): 13–20.
- Qiang Zitong, Zeng Deming, Wang Xingzhi, et al. Isotopic geochemical characteristics of oolitic bank dolostones in the Lower Triassic Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Province [J]. Journal of Paleogeography, 2012, 14(1): 13–20.
- [38] 胡光灿, 谢姚祥. 中国四川东部高陡构造石炭系气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- Hu Guangcan, Xie Yaoxiang. The Carboniferous gas fields in steep structure region of eastern Sichuan [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [39] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志. 卷十, 四川油气区[M]. 石油工业出版社, 1989.
- Compiling group of petroleum geology in Sichuan petroliferous region. Petroleum geology of China-the region of Sichuan Basin [M]. Beijing, Petroleum Industry Press, 1989, 96–108.
- [40] 孟昊, 任影, 钟大康, 等. 四川盆地东部寒武系龙王庙组地球化学特征及其古环境意义[J]. 天然气地球科学. 2016, 27(7): 1299–1311.
- Meng Hao, Ren Ying, Zhong Dakang, et al. Geochemical characteristics and its paleoenvironmental implication of Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1299–1311.
- [41] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite Reservoirs: Geochemical Techniques for Evaluating Origin and Distribution [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 1993, 14(S3–4): 262–263.
- [42] Jiang L, Cai C, Worden R H, et al. Multiphase dolomitization of deeply buried Cambrian petroleum reservoirs, Tarim Basin, north - west China [J]. Sedimentology, 2016, 63(7).
- [43] 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(1): 1586.
- [44] Land L S. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art [J]. International Journal of Modern Physics A, 1980, 19(5): 459–477.
- [45] Mckenzie J A. Holocene dolomitization of calcium carbonate sediments from the coastal sabkhas of Abu Dhabi, U. A. E.: A stable isotope study [J]. Journal of Geology, 1981, 89(2): 185–198.
- [46] 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.
- [47] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1984, 48(12): 2469–2482.
- [48] 陈松, 傅雪海, 孙林华, 等. 皖北新元古代–寒武纪界线灰岩稀土元素地球化学特征[J]. 中国稀土学报, 2013, 31(1): 108–118.
- Chen Song, Fu Xuehai, Sun Linhua, et al. Geochemical characteristics of REE in limestone across Neoproterozoic-Cambrian Transition on northern Anhui Province [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2013, 31(1): 108–118.
- [49] 周秦, 田辉, 王艳飞, 等. 川中古隆起下寒武统烃源岩生烃演化特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1883–1892.
- Zhou Tai, Tian Hui, Wang Yanfei, et al. The generation and evolution characteristic of the Lower Cambrian shale in the central Sichuan Paleouplift [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(10): 1883–1892.
- [50] 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 多参数综合识别塔里木盆地地下古生界白云岩成因[J]. 石油学报. 2012, 33(s2): 145–153.
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Multi-parameter comprehensive identification of the genesis of Lower Paleozoic dolomite in Tarim Basin, China [J]. Acta Petrolei sinica, 2012, 33(2): 145–153.
- [51] 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 277–284.
- Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xijuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significant of reservoirs in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 277–284.

(编辑 张玉银)