

塔东地区米兰1井寒武系白云岩成因及其对储层的影响

郭春涛^{1,2},宋海强³,梁洁⁴,倪玲梅⁵

(1. 山西工程技术学院 地质与环境工程系,山西 阳泉 045000; 2. 中国石油 大庆油田有限责任公司 人才开发院,黑龙江 大庆 163453;
3. 陕西延长石油国际勘探开发工程有限公司,陕西 西安 710075; 4. 山西大同大学 建筑与测绘工程学院,山西 大同 037003;
5. 曲靖师范学院 文化旅游学院,云南 曲靖 655011)

摘要:白云岩储层展布是塔里木盆地塔东地区深层白云岩油气藏勘探的关键问题。为认识塔里木盆地塔东低凸起米兰地区寒武系白云岩,选取典型井米兰1井,在岩心和镜下薄片观测的基础上,对各种类型的白云岩进行了稀土元素地球化学特征测试。结果表明,各类白云岩稀土元素含量均较低,且随着晶粒增大,总质量分数减小;不同类型白云岩的 δEu 异常显著不同,泥微晶、细晶、中晶和粗晶白云岩的 δEu 分别介于0.97~1.08,0.77~1.05,0.80~3.23,0.81~2.23;大部分样品 δCe 负异常,介于0.86~1.02。所有样品稀土元素PAAS配分模式分为3种类型,即 δEu 负异常型、 δEu 正异常型和 δEu 无异常型。在白云石化过程中,蒸发泵机制是米兰1井寒武系白云岩的基础成因,第一种白云岩后期还受到埋藏环境的影响,第二种后期还受到热液环境改造,第三种形成于回流渗透机制。白云岩储层的形成受多种条件的控制,其中有利的沉积环境是储层形成的先决条件,大规模白云石化是储层形成的基石,裂缝体系对储层有多重影响,而溶蚀作用是储层形成的关键。

关键词:稀土元素;地球化学;白云化;白云岩;寒武系;米兰1井;塔东地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Origin of Cambrian dolomite from Well Milan 1 in Tadong area and its significance to dolomite reservoirs

Guo Chuntao^{1,2}, Song Haiqiang³, Liang Jie⁴, Ni Lingmei⁵

(1. Department of Geological and Environmental Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China;
2. HRD Center of Daqing Oilfield Company, CNPC, Daqing, Heilongjiang 163453, China;
3. Petroleum International Exploration and Development Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China;
4. College of Architecture and Surveying Engineering, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037003, China;
5. Qujing Tourism Development Research Institute, Qujing Normal University, Qujing, Yunnan 655011, China)

Abstract: Knowing reservoir distribution pattern is key to the exploration of deep dolomite reservoirs in the eastern Tarim Basin. To understand the origin of the Cambrian dolomite in the Milan area of the Tadong low uplift, we measured the rare earth elements (REE) of dolomite of various types taken from a representative well Milan 1 for geochemical characterization based on core and thin section observations. The results show that the content of all REEs in various dolostones is low, and the total mass fraction decreases with the increase of grain size. There are obvious differences in δEu anomalies for dolostones of different types. The δEu anomaly values of silty-micritic, finely-crystalline, medium-crystalline and coarse-crystalline dolostones range between 0.97 - 1.08, 0.77 - 1.05, 0.80 - 3.23 and 0.81 - 2.23, respectively. Most of the samples have negative δCe anomaly values, ranging from 0.86 to 1.02. The results show that the PAAS-normalized pattern of REEs in all samples can be divided into three types: the negative, positive and normal types. An in-depth study on the dolomitization process demonstrates that the formation of the Cambrian dolomite is essentially caused by evaporation pump mechanism. In addition, the dolomite of the negative type was also under the impact of a burial environment at a later formation stage; the positive type was modified in a hydrothermal environment at a later stage; and the normal type was mainly formed under the effect of seepage reflux. In conclusion, the formation of dolomite reservoirs is conditioned by a variety of factors, including a favorable distribution of sedimentary facies as a prerequisite;

收稿日期:2018-10-18;修订日期:2020-08-08。

第一作者简介:郭春涛(1981-),博士、讲师,沉积学。E-mail: xinylx521@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41802171)。

large-scale dolomitization as the foundation; dissolution as the key, and the fracture systems as versatile influencers.

Key words: rare earth element (REE), geochemistry, dolomitization, dolomite, Cambrian, Well Milan 1, Tadong area, Tarim basin

塔里木盆地震旦系-奥陶系发育巨厚的碳酸盐岩,一直是重要的勘探领域。尽管在古城地区取得显著突破,相继在古城6和古城8等井获得高产气流^[1],揭示了震旦系-奥陶系巨厚的烃源岩和储集层发育,展现了深层白云岩巨大的勘探潜力,然而塔东探区白云岩油气藏勘探仍然举步维艰,其中的关键问题之一是优质储层的预测。要预测白云岩储层的展布,首要搞清楚白云岩的成因和成储控制因素。由于震旦系-奥陶系白云岩储层普遍埋深大、成岩演化时间长,经历了多期复杂的构造-流体活动,普遍具有成因复杂、形成机制差异大等特点。前人针对塔里木盆地地下古生界白云岩提出了多种成因模式^[2-8],如蒸发泵作用^[2,4,6]、渗透回流作用^[3,5,7]、热液白云化作用^[2-5]、埋藏白云化作用^[2-5,7]及微生物白云岩作用^[8]等。然而由于塔东地区仅有10多口探井钻遇寒武系,且相关研究主要集中于古地理、沉积环境、烃源岩和地球化学特征^[1,9-13],而针对寒武系白云岩储层的研究较少^[14-15],从而导致白云岩成因不清,储层形成机理及控制因素不明,储层垂向发育和横向展布不详,严重滞后了塔东地区深层白云岩油气藏的勘探步伐。

白云岩的成因和储层形成机理往往很复杂,白云石化流体多样,有大气淡水或地表水、埋藏流体、深部热液,还可能有混合流体^[2-4,16-17],对白云石化流体的追踪是研究白云岩储层形成的关键问题之一。以往人们通常使用同位素示踪技术(C、O和Sr同位素等)解决流体来源问题,解决了部分问题,但也存在多解性^[18]。稀土元素(REE)具有稳定的地球化学特征,自然界中不同来源的流体具有不同的稀土元素特征,而白云岩中的稀土元素是成岩流体和原岩相互作用的结果,所以可以用其示踪成岩流体。已经有不少国内外学者将其应用于白云石化流体性质的研究,并取得了不少成果^[2,4-7,11-13,18]。本文以塔东地区典型井米兰1井的岩心、薄片和地化等资料为基础,通过稀土元素特征分析,结合前人资料,探讨了白云石化流体的特征,丰富了该区对白云岩成因的认识,解析了白云岩储层的成因,将有助于米兰地区乃至塔东地区寒武系白云岩储层的预测。

1 地质背景

塔里木盆地是在前震旦系结晶基底之上发展形成

的大型叠合盆地。塔东低凸起位于盆地东南部、中央隆起带东端、车尔臣断裂下盘(图1a),西为古城鼻隆,北邻英吉苏凹陷,南接罗布庄凸起,是在加里东-海西-印支期褶皱基础上发育起来的巨型长轴背斜。米兰构造带位于塔东低凸起的东端,紧邻英吉苏凹陷,平面上呈北东-南西向展布,米兰1井即位于米兰构造带的东部。

受全球泛大陆解体的影响,寒武纪塔里木地块整体处于稳定拉张构造背景,岩浆侵入和喷发活动较少,西部发育了大型的塔西孤立台地,东部发育罗西局限台地,中间为塔东深水盆地^[9]。米兰构造带位于罗西台地的西边缘,区内缺失震旦系,发育较完整的寒武系-奥陶系,缺失志留系-三叠系。目前没有井钻穿下寒武统西大山组 and 西山布拉克组,其主要为盆地相的灰黑色泥岩^[9](图1b)。中统莫合尔山组水体逐渐变浅,为一套上斜坡、陆棚沉积,下部岩性以泥岩、泥质灰岩为主,上部以含泥(含云)灰岩、灰岩、泥灰岩为主。上寒武统-下奥陶统研究区处于罗西台地边缘,突尔沙克塔格组下部以白云岩、含灰(含泥)云岩和灰质云岩为主,为一套台地边缘、台缘斜坡相沉积;上部以泥质灰岩、灰岩、泥岩和云质灰岩为主,为一套向上变深的陆棚、斜坡相沉积。中-下奥陶统黑土凹组以厚层灰黑色泥岩为主,反映水体持续加深,为一套盆地相沉积^[19]。上奥陶统却尔却克组以极细粒-细粒沉积物为主,夹泥灰岩、硅质泥岩,鲍马序列发育,以盆地相和海底扇相为主。志留纪之后,塔东地区抬升并强烈剥蚀,侏罗系直接覆盖于奥陶系之上。

2 岩石学特征

米兰1井寒武系白云岩主要分布在突尔沙克塔格组中下部和莫合尔山组中部。薄片鉴定和扫描电镜分析表明,白云岩主要为泥微晶白云岩、晶粒白云岩以及部分鞍形白云石,基本不发育颗粒白云岩。晶粒白云岩可进一步分为细晶白云岩、中晶白云岩和粗晶白云岩。

泥微晶白云岩分布较多,通常晶体细小、它形为主(图2a),晶体结构和晶形常难以识别,多呈镶嵌接触,表面较脏,部分可见缝合线和构造裂缝。

细晶白云岩分布最多,晶体以半自形、它形为主

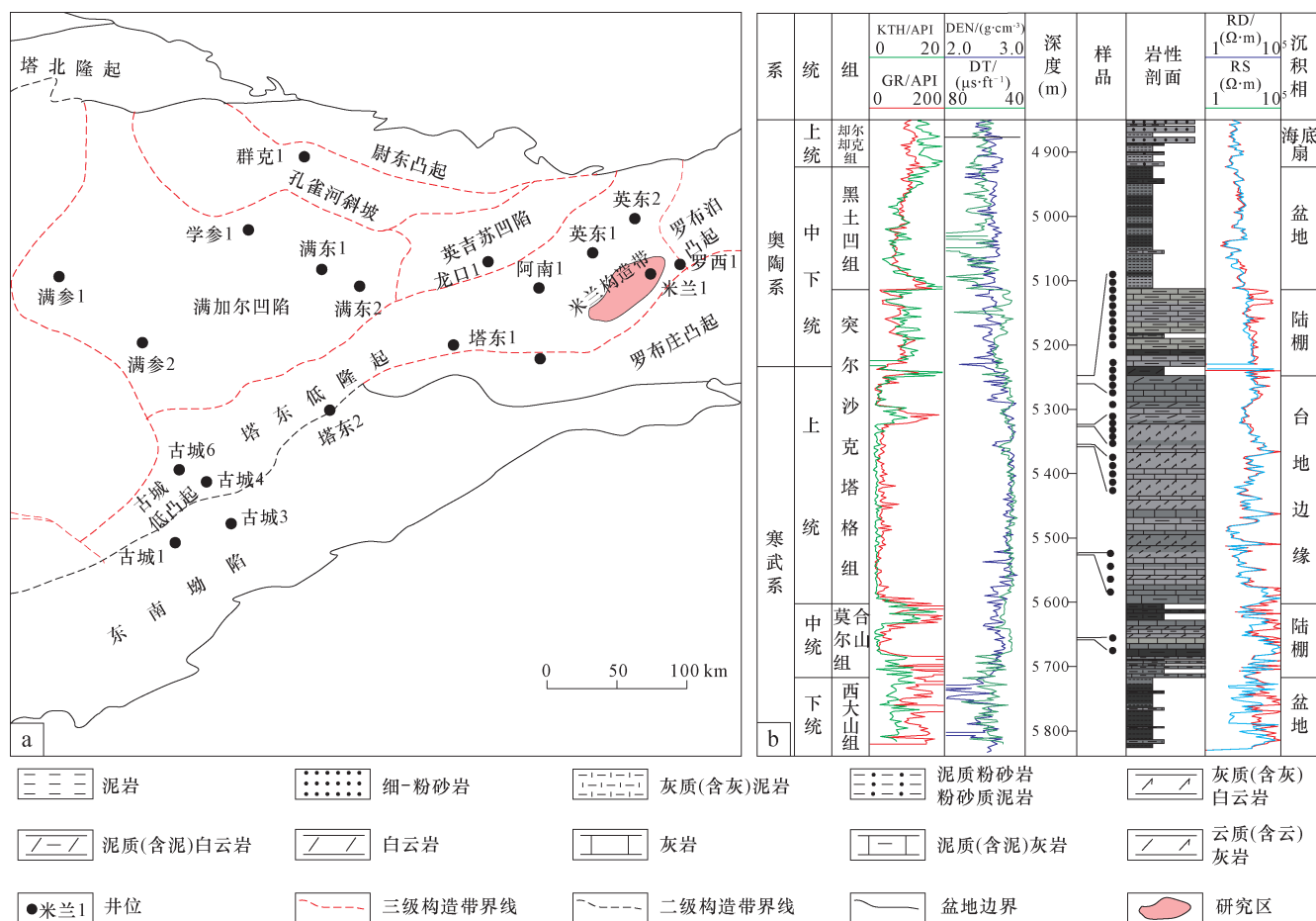


图1 塔东地区位置(a)及米兰1井地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Geological sketch map of the Tadong area (a) and stratigraphic column of Well Milan 1 (b)

(图 2b), 大多较脏, 多呈线接触、凹凸接触和镶嵌接触, 部分可见鸟眼和窗格构造。常见“雾心亮边”结构、环带结构。偶见部分被硅质充填(图 2d, h)。宏观上以浅灰黑色中厚层状或块状为主。

中晶白云岩晶体以它形、半自形为主(图 2c), 少量自形, 部分具波状消光, 晶粒间凹凸接触、线接触、缝合接触均见。晶间孔、构造缝被沥青质、硅质和方解石充填, 部分白云石发生硅化。宏观上以灰色或深灰色为主, 呈条带状或中薄层状为主。

粗晶白云岩整体分布较少,晶体粗大,晶面大多较干净,晶形多以曲面、半自形和自形为主(图 2e,f),晶粒多呈镶嵌状、线状分布。部分具波状消光,可见“雾心亮边”和环带结构(图 2g)。部分孔隙中充填了硅质和沥青质,部分白云岩被硅化。宏观上整体以灰色或灰黑色块状、透镜状和条带状为主。

鞍形白云石多为热液产物,晶体粗大,以自形为主,晶面多发生弯曲,晶体干净。多以孔洞或裂缝充填物出现(图 2j),部分手标本上可见(图 2i,j),多呈白色产出。

3 样品与实验

用于测试分析的 28 个样品主要来自米兰 1 井突尔沙克塔格组,部分来自莫合尔山组(图 1b)。在进行稀土元素测试之前,首先进行岩心观察,分析白云岩在岩心上的产出特征,选取白云岩发育良好的井段,避开裂缝,通过薄片分析,挑选无明显泥质和铁质等杂质的白云岩纯度高的样品,同时保证测试样品包含不同粒度的白云岩,最后委托成都理工大学油气藏地质及开发国家重点实验室完成测试(表 1)。测试结果采用后太古代澳大利亚页岩(PAAS)稀土元素含量进行标准化。

4 白云岩稀土元素地球化学特征

一般情况下,纯白云岩的 REE 含量都很低。样品 ML-01 的 REE 含量为 71.129×10^{-6} ,明显高于其他样品(图 3a),因此下文分析时,该样品仅作为参考。

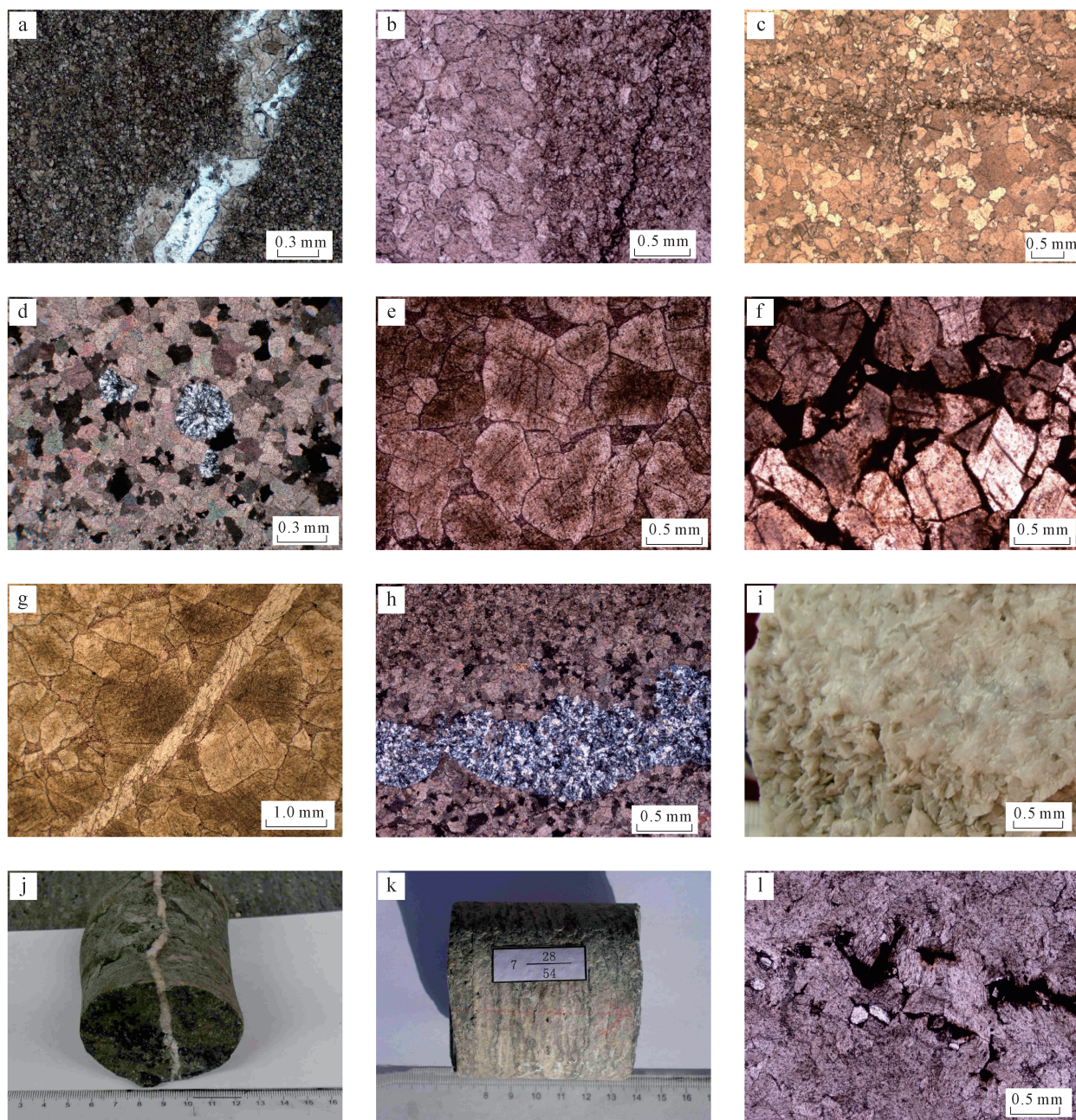


图2 塔东地区米兰1井寒武系白云岩岩心及显微镜下特征

Fig. 2 Images showing the Cambrian dolomite core samples under microscope and naked eyes from Well Milan 1 in the Tadong area

a. 埋深5 260.11 m, 泥微晶白云岩, 晶粒极细小, 较均匀, 缝洞内见鞍形白云石充填; b. 埋深5 356.49 m, 粉-细晶它形白云岩, 表面脏, 见缝合线, 部分被沥青充填; c. 埋深5 524.30 m, 细-中晶它形白云岩, 表面脏, 见缝合线切割白云石颗粒; d. 埋深5 356.60 m, 细晶它形白云岩, 镶嵌接触, 见硅质充填; e. 埋深5 253.41 m, 中-粗晶半自形-它形白云岩, 凹凸接触, 雾心亮边结构; f. 埋深5 254.34 m, 中-粗晶半自形-自形白云岩, 表面脏, 见晶间孔, 部分被沥青充填; g. 埋深5 253.51 m, 粗晶它形白云岩, 凹凸接触, 雾心亮边结构, 见裂缝被方解石充填; h. 埋深5 355.82 m, 硅质粉-细晶白云岩, 见硅化斑块, 呈玉髓产出; i. 埋深5 524.29 m, 鞍形白云石, 岩心; j. 埋深5 324.88 m, 粉晶白云岩, 裂缝被白云石完全充填; k. 埋深5 356.52 m, 粉晶白云岩, 发育热液溶蚀洞; l. 埋深5 262.21 m, 中-粗晶白云岩, 边缘被有机酸溶蚀而参差不齐

4.1 REE 总量

各类白云岩稀土元素总质量分数 (ΣREE) 为 $(3.724 \sim 46.005) \times 10^{-6}$ (表1; 图3a), 平均为 19.924×10^{-6} 。其中泥微晶、细晶、中晶和粗晶白云岩 ΣREE 依

次为 28.313×10^{-6} , 22.320×10^{-6} , 18.727×10^{-6} 和 10.556×10^{-6} 。样品随着晶粒增大, 总质量分数减小。

4.2 LREE 和 HREE 含量

不同类型碳酸盐岩样品轻重稀土含量不同, 总体

表 1 塔东地区米兰 1 井寒武系白云岩稀土元素含量及参数

Table 1 Contents and characteristic parameters of REEs in the Cambrian dolomite from Well Milan 1, Tadong area

样品编号	深度/m	岩性	稀土元素含量/ 10^{-6}							
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy
ML-01	5 252.66	粗晶白云岩	17.982 9	33.692 9	3.216 3	11.547 7	1.676 4	0.421 4	0.163 9	0.967 5
ML-02	5 523.96	中-粗晶白云岩	5.180 0	8.610 0	1.019 0	3.680 0	0.539 0	0.196 0	0.051 0	0.280 0
ML-03	5 524.67	中-粗晶白云岩	1.865 7	3.232 3	0.366 4	1.573 1	0.324 0	0.070 7	0.039 6	0.230 7
ML-04	5 358.11	中-粗晶白云岩	0.732 6	1.465 3	0.178 4	0.711 9	0.182 2	0.025 9	0.020 5	0.167 0
ML-05	5 656.70	中晶白云岩	2.394 0	4.474 5	0.495 7	1.519 0	0.300 9	0.067 6	0.040 4	0.281 7
ML-06	5 356.35	中晶白云岩	1.196 6	2.443 6	0.294 5	1.306 1	0.274 5	0.041 3	0.036 2	0.264 0
ML-07	5 260.86	细-中白云岩	3.393 7	6.073 6	0.698 0	2.580 4	0.478 0	0.105 3	0.046 1	0.320 0
ML-08	5 253.90	细-中白云岩	9.941 0	16.918 0	1.624 0	4.795 0	0.961 0	0.493 0	0.136 0	0.661 0
ML-09	5 523.29	细-中晶白云岩	3.090 0	5.020 0	0.470 0	1.440 0	0.230 0	0.140 0	0.030 0	0.170 0
ML-10	5 523.72	细-中晶白云岩	4.324 4	8.666 1	0.886 0	3.280 6	0.521 4	0.157 3	0.042 8	0.274 1
ML-11	5 324.71	细-中晶白云岩	1.210 0	2.746 1	0.323 2	1.387 8	0.293 9	0.047 5	0.036 1	0.270 3
ML-12	5 253.90	细-粗白云岩	8.345 0	15.641 0	1.523 0	4.153 0	0.865 0	0.218 0	0.097 0	0.549 0
ML-13	5 252.78	细-粗晶白云岩	8.145 0	14.357 0	1.692 0	5.748 0	1.270 0	0.401 0	0.147 0	0.691 0
ML-14	5 289.13	细晶白云岩	8.264 6	16.003 2	1.993 5	8.277 9	1.741 9	0.269 7	0.202 8	1.308 7
ML-15	5 323.73	细晶白云岩	1.190 6	2.456 6	0.291 8	1.200 0	0.229 0	0.037 7	0.032 0	0.228 2
ML-16	5 355.97	细晶白云岩	1.328 9	2.992 3	0.393 2	1.680 6	0.330 8	0.051 8	0.043 0	0.294 1
ML-17	5 259.37	微-细晶白云岩	5.476 4	12.490 1	1.555 9	6.141 4	1.199 9	0.171 0	0.151 3	0.976 5
ML-18	5 356.49	微-细晶白云岩	1.596 0	3.202 0	0.383 0	1.513 0	0.308 0	0.060 0	0.062 0	0.348 0
ML-19	5 249.35	微-细晶白云岩	5.728 0	11.931 8	1.340 7	5.213 8	0.961 5	0.171 7	0.109 0	0.670 0
ML-20	5 249.83	微-细晶白云岩	8.858 3	16.884 2	1.893 0	6.445 0	1.187 3	0.233 2	0.154 3	0.939 3
ML-21	5 255.84	泥微晶白云岩	6.183 3	11.618 9	1.163 5	4.236 8	0.820 7	0.148 7	0.091 9	0.601 5
ML-22	5 250.81	泥微晶白云岩	7.434 4	16.694 4	1.934 4	7.109 0	1.434 9	0.245 9	0.162 2	1.070 2
ML-23	5 252.50	泥微晶白云岩	9.638 3	20.162 9	2.307 4	8.710 1	1.588 3	0.279 0	0.189 2	1.260 8
ML-24	5 658.19	泥微晶白云岩	2.502 5	4.980 1	0.561 2	2.086 2	0.357 6	0.076 4	0.055 4	0.390 7
ML-25	5 253.15	泥微晶白云岩	7.961 9	15.698 6	1.807 4	6.356 1	1.141 8	0.221 2	0.136 9	0.840 9
ML-26	5 258.72	泥微晶白云岩	2.911 3	6.092 3	0.677 8	2.565 9	0.478 0	0.092 4	0.056 5	0.324 5
ML-30	5 326.14	硅质中晶白云岩	1.438 0	3.251 1	0.377 7	1.515 9	0.348 1	0.047 1	0.038 6	0.252 7
ML-31	5 326.55	硅质中晶白云岩	0.745 2	1.589 8	0.192 3	0.789 4	0.173 2	0.025 1	0.018 4	0.139 8

样品编号	稀土元素含量/ 10^{-6}					$\Sigma\text{REE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{LREE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{HREE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	δCe	δEu	δPr	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$
	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
ML-01	0.215 2	0.608 9	0.085 0	0.486 0	0.065 3	71.129 4	68.537 6	2.591 8	26.44	1.01	1.52	0.95	2.73
ML-02	0.050 0	0.157 0	0.021 0	0.114 0	0.016 0	19.913 0	19.224 0	0.689 0	27.90	0.86	2.23	1.06	3.35
ML-03	0.051 1	0.152 4	0.018 7	0.096 3	0.010 3	8.031 3	7.432 2	0.599 1	12.41	0.90	1.20	0.95	1.43
ML-04	0.038 6	0.109 1	0.013 5	0.070 8	0.007 7	3.723 5	3.296 3	0.427 2	7.72	0.93	0.81	1.03	0.76
ML-05	0.064 0	0.183 1	0.020 9	0.090 6	0.012 0	9.944 4	9.251 7	0.692 7	13.36	0.95	1.18	1.11	1.95
ML-06	0.061 3	0.178 1	0.023 8	0.138 6	0.014 6	6.273 2	5.556 6	0.716 6	7.75	0.95	0.79	0.96	0.64
ML-07	0.072 2	0.201 8	0.027 6	0.154 5	0.017 8	14.169 0	13.329 0	0.840 0	15.87	0.91	1.34	1.04	1.62
ML-08	0.128 0	0.347 0	0.049 0	0.299 0	0.041 0	36.393 0	34.732 0	1.661 0	20.91	0.96	2.62	1.04	2.45
ML-09	0.040 0	0.110 0	0.015 0	0.080 0	0.010 0	10.845 0	10.390 0	0.455 0	22.84	0.94	3.23	1.01	2.85
ML-10	0.060 8	0.171 1	0.020 7	0.108 8	0.011 9	18.526 0	17.835 8	0.690 2	25.84	1.02	1.95	0.98	2.93
ML-11	0.067 8	0.186 8	0.027 7	0.160 8	0.022 9	6.780 9	6.008 5	0.772 4	7.78	1.01	0.88	0.97	0.56
ML-12	0.101 0	0.296 0	0.046 0	0.263 0	0.039 0	32.136 0	30.745 0	1.391 0	22.10	1.01	1.44	1.08	2.34
ML-13	0.137 0	0.407 0	0.063 0	0.358 0	0.057 0	33.473 0	31.613 0	1.860 0	17.00	0.89	1.77	1.10	1.68
ML-14	0.243 8	0.752 3	0.101 4	0.660 1	0.096 0	39.915 9	36.550 8	3.365 1	10.86	0.91	0.87	1.01	0.92
ML-15	0.053 9	0.149 8	0.023 9	0.141 0	0.016 2	6.050 7	5.405 7	0.645 0	8.38	0.96	0.85	1.00	0.62
ML-16	0.070 1	0.198 9	0.026 4	0.140 2	0.015 3	7.565 6	6.777 6	0.788 0	8.60	0.95	0.83	1.02	0.70
ML-17	0.190 1	0.548 9	0.080 3	0.410 0	0.063 0	29.454 8	27.034 7	2.420 1	11.17	0.98	0.77	1.04	0.99
ML-18	0.077 0	0.213 0	0.032 0	0.171 0	0.027 0	7.992 0	7.062 0	0.930 0	7.59	0.94	0.82	1.02	0.69
ML-19	0.151 3	0.414 2	0.056 6	0.290 8	0.041 3	27.080 7	25.347 5	1.733 2	14.62	0.99	1.01	1.00	1.45
ML-20	0.219 2	0.615 1	0.098 7	0.576 7	0.076 6	38.180 9	35.501 0	2.679 9	13.25	0.95	1.04	1.07	1.13
ML-21	0.136 1	0.348 7	0.046 3	0.281 0	0.040 2	25.717 6	24.171 9	1.545 7	15.64	0.99	1.03	0.97	1.62
ML-22	0.223 9	0.593 5	0.071 7	0.406 0	0.061 2	37.441 7	34.853 0	2.588 7	13.46	1.01	0.97	1.04	1.35
ML-23	0.251 6	0.789 2	0.113 6	0.617 8	0.096 8	46.005 0	42.686 0	3.319 0	12.86	0.99	0.97	1.02	1.15
ML-24	0.094 0	0.264 5	0.039 0	0.169 0	0.023 5	11.600 1	10.564 0	1.036 1	10.20	0.97	1.04	1.02	1.09
ML-25	0.184 3	0.499 3	0.073 6	0.452 5	0.056 2	35.430 7	33.187 0	2.243 7	14.79	0.95	1.07	1.06	1.30
ML-26	0.074 4	0.219 1	0.027 4	0.143 2	0.018 3	13.681 1	12.817 7	0.863 4	14.85	1.00	1.08	1.01	1.50
ML-30	0.061 7	0.182 6	0.026 4	0.140 2	0.019 1	7.699 2	6.977 9	0.721 3	9.67	1.02	0.77	1.00	0.76
ML-31	0.035 2	0.101 0	0.013 1	0.078 3	0.010 1	3.910 9	3.515 0	0.395 9	8.88	0.97	0.85	1.01	0.70

注:下标 N 代表稀土元素的 PAAS 标准化值。 ΣREE 、 ΣLREE 和 ΣHREE 分别代表总稀土、轻稀土和重稀土元素质量分数。
 $\delta\text{Ce}=2\text{Ce}_{\text{N}}/(\text{La}_{\text{N}}+\text{Pr}_{\text{N}})$, $\delta\text{Eu}=2\text{Eu}_{\text{N}}/(\text{Sm}_{\text{N}}+\text{Tb}_{\text{N}})$, $\delta\text{Pr}=2\text{Pr}_{\text{N}}/(\text{Ce}_{\text{N}}+\text{Nd}_{\text{N}})$ 。

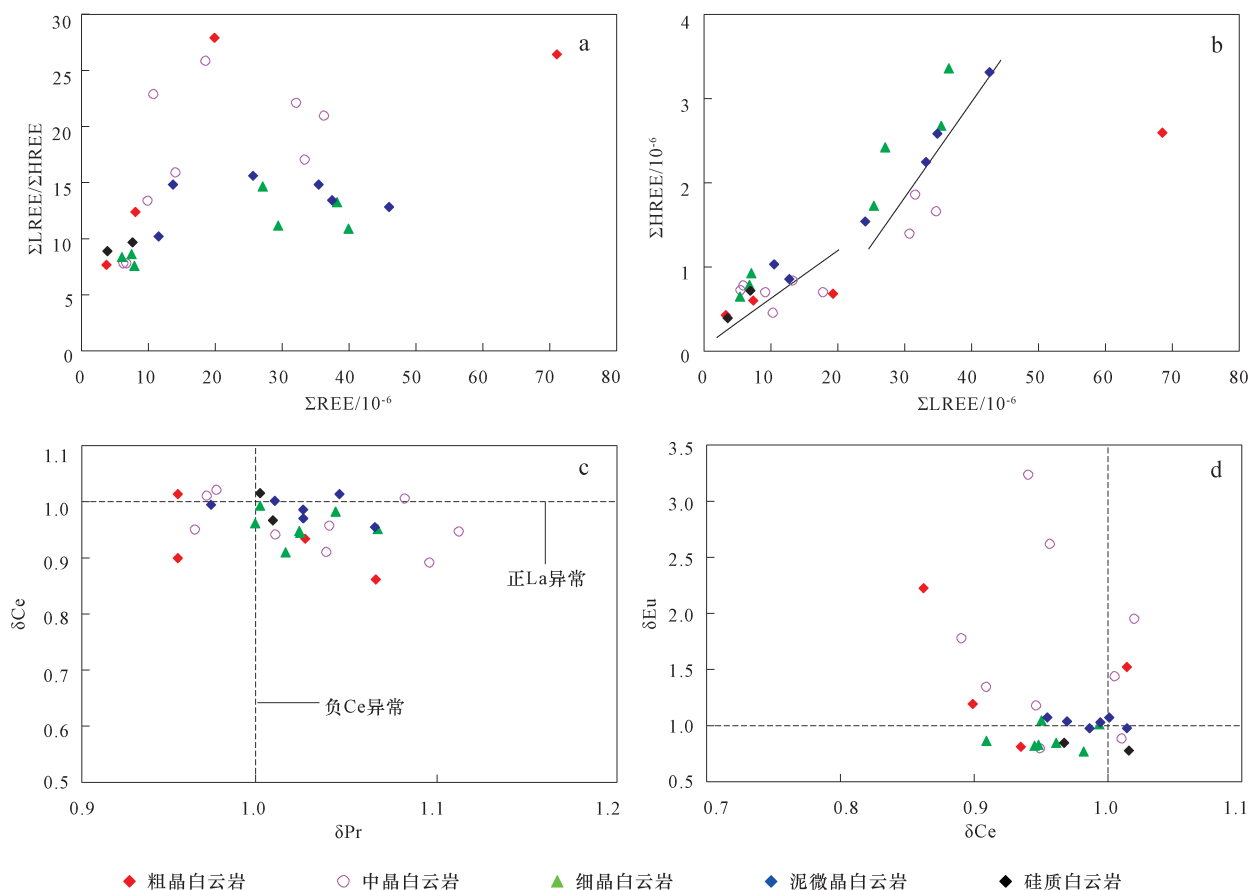


图3 塔东地区米兰1井寒武系白云岩稀土元素特征参数

Fig. 3 REE geochemical characteristics of the Cambrian dolomite from Well Milan 1 in the Tadong area

a. 样品稀土元素 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 变化特征; b. 样品 ΣLREE 和 ΣHREE 变化特征;
c. 样品 δCe 和 δPr 变化特征; d. 样品 δEu 和 δCe 变化特征

上轻稀土元素总质量分数(ΣLREE)、重稀土元素总质量分数(ΣHREE)线性关系可分为两段(图3b),说明不同粒度白云岩经历的沉积和成岩环境具有显著差异,白云化过程和流体可能有多种。轻、重稀土元素含量之比显示(图3a),泥微晶、细晶白云岩为13.633, 10.640(图3a),中晶、粗晶白云岩为17.049, 18.617(图3a),细粒白云岩和粗粒白云岩轻、重稀土元素具有不同的协同迁移性,也说明其成岩过程和流体可能有多种。

4.3 δCe 和 δEu

δCe 和 δPr 图解(图3c)在判断La和Ce异常方面作用明显^[20]。大部分白云岩样品 δPr 大于1.0或非常接近1.0(图3c),大部分 δCe 小于1.0或非常接近1.0,表明样品的Ce负异常、La正异常的特征是确实存在的。

研究区 δEu 异常值变化较大(表1;图3d)。不同类型白云岩的 δEu 异常程度存在明显差别(图3d),泥

微晶白云岩 δEu 介于0.97~1.08;细晶白云岩 δEu 介于0.77~1.05;中晶白云岩 δEu 介于0.80~3.23;粗晶白云岩 δEu 介于0.81~2.23,表明每种类型白云岩均可能有多种成因。大部分样品具有 δCe 负异常特征,介于0.86~1.02(表1;图3d)。

4.4 REE 配分模式

稀土元素配分模式可以反映碳酸盐岩沉积和成岩流体特征。以太古代澳大利亚页岩(PAAS)为标准,将米兰1井稀土元素标准化后,其配分模式可分为3类(图4)。

1) δEu 负异常型(图4a)。该类样品岩性主要为中-细粒白云岩,包括细-中晶白云岩、中晶白云岩和细晶白云岩。样品 δEu 均为负异常,介于0.77~0.88,平均为0.82。 δCe 多数为微负异常,介于0.91~1.02,平均为0.96。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均为0.73,配分曲线左倾,表现出轻稀土稍亏损、重稀土稍富集特征。

2) δEu 正异常型(图4b)。该类样品岩性主要为

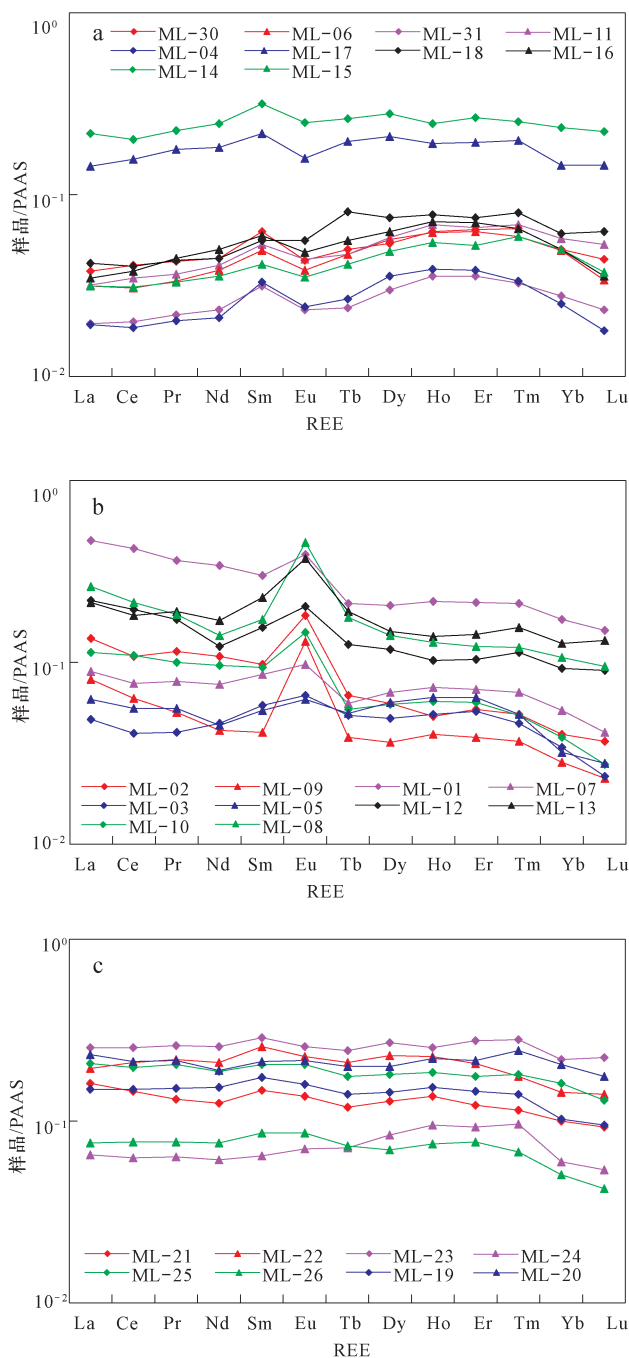


图4 塔东地区米兰1井寒武系白云岩稀土元素
PAAS 标准化配分模式

Fig. 4 PAAS normalized REE distribution patterns of the
Cambrian dolomite from Well Milan 1, Tadong area
a. δEu 负异常型; b. δEu 正异常型; c. δEu 无异常型

粗粒白云岩,包括细-中晶白云岩、中-粗晶白云岩和粗晶白云岩。样品 δEu 均为正异常,介于 1.18 ~ 3.23,平均为 1.85。 δCe 多数为微负异常,介于 0.86 ~ 1.02,平均为 0.94。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均为 2.34,表现出轻稀土富集、重稀土亏损特征。

3) δEu 无异常型(图 4c)。该类样品岩性主要为

泥微晶白云岩和微-细晶白云岩。样品 δEu 基本无异常,介于 0.97 ~ 1.08,平均为 1.03。 δCe 基本无异常,介于 0.95 ~ 1.01,平均为 0.98。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均为 1.33,配分曲线近似水平,表现出轻稀土稍富集、重稀土稍亏损特征。

5 白云岩成因

前文述及,随着晶粒增大,总质量分数减小,说明白云化过程中稀土元素发生明显迁移贫化,白云化流体与原岩沉积时的流体特征不完全一致。一般来说,由于蒸发浓缩原因,蒸发海水的稀土含量相对较高,所以形成的泥粉晶白云岩具有较高的稀土含量。而由于海水、大气水和地下水等稀土含量比蒸发海水低的多^[18],后期流体改造会使较粗粒白云岩稀土含量降低。据此,较细粒白云岩可能形成于蒸发或回流渗透环境。同时,与典型的海水具有轻稀土相对亏损、重稀土相对富集特征不同,研究区不同粒度白云岩具有不同的富集特征(表 1),也说明其成岩流体不仅包含同期海水,还可能包含其他流体。

据前人研究,在不同的氧化、还原、温度等条件下,稀土元素 Ce 和 Eu 具有不同的化学特征,常因变价而出现溶解性差异,进而导致 δCe 和 δEu 呈现异常,其能有效的指示成岩环境^[21-22]。依据 Ce 和 Eu 特征参数,结合稀土元素组成及配分模式等,可将样品分为以下几种类型。

5.1 δCe 负异常型样品

研究区大部分样品(图 4a,b)都显现出 δCe 负异常特征(表 1;图 3c),这与 Heron reef 全新世正常海水碳酸盐岩的 δCe 接近^[23],且两者都具有相似的轻稀土相对亏损、重稀土相对富集特征,表明样品的成岩流体为浓缩海水。同时, δCe 负异常特征与塔里木盆地其他地区蒸发泵模式白云岩特征一致^[2,4,11],也与研究区沉积环境、地理位置、干热气候特征相符合,表明米兰 1 井寒武系白云岩大多形成于蒸发泵机制(图 5a)。

在寒武纪台地边缘环境中,干热的气候、较浅的水体、频繁的海平面波动,常使局部发生暴露,使海水蒸发浓缩。浓缩海水作用于先前沉积的文石颗粒使其白云化。这种模式下,白云岩形成时温度低、盐度高、结晶速度快,所以一般晶粒细小、表面脏、它形晶为主,与样品的镜下特征一致(图 2)。

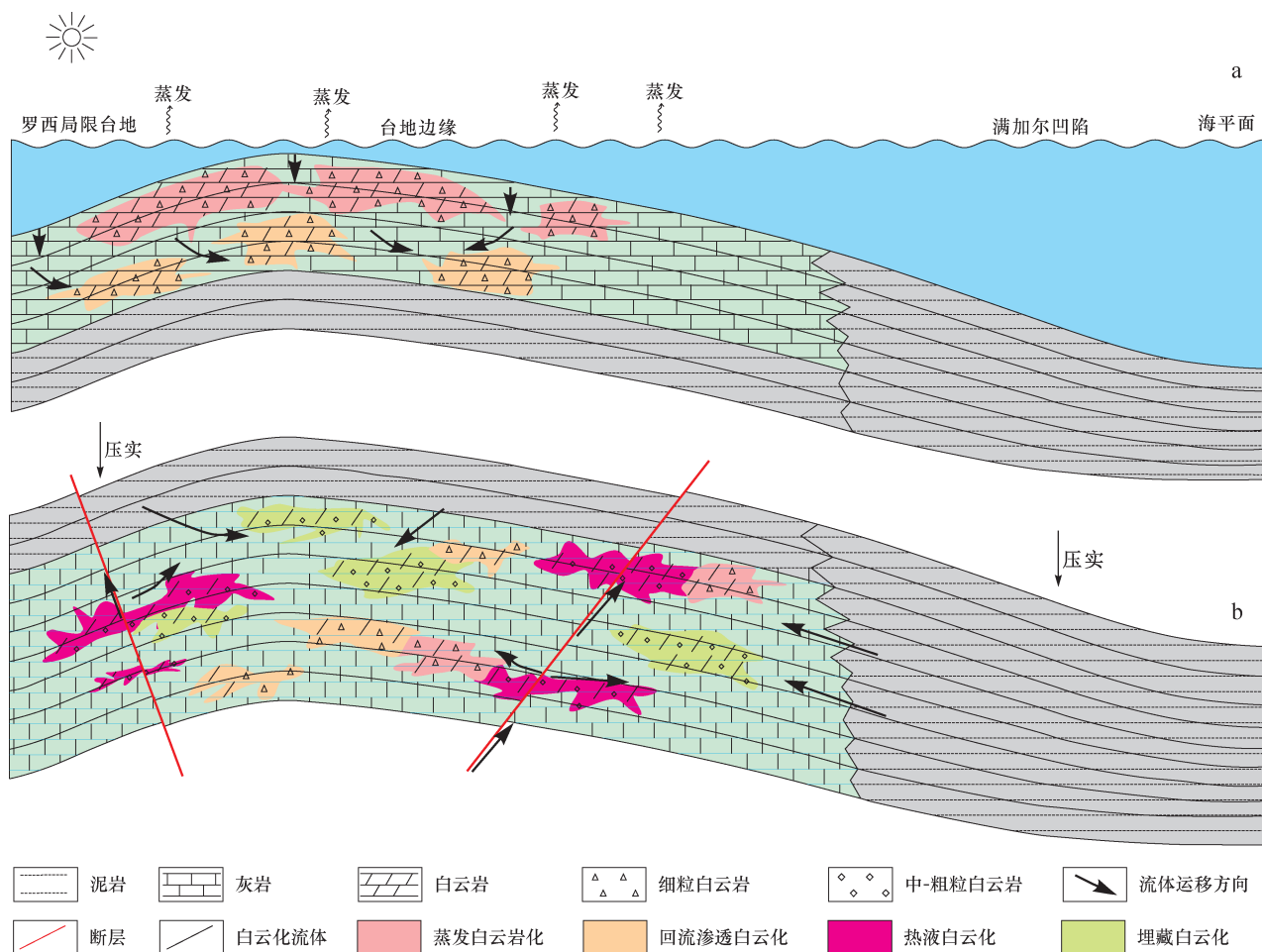


图5 塔东地区米兰1井寒武系白云岩成因模式

Fig. 5 Genesis models of the Cambrian dolomite from Well Milan 1, Tadong area

a. 埋藏初期白云化模式; b. 埋藏中、后期白云化模式

5.2 δEu 负异常型样品

图4a中样品 δEu 负异常,平均为0.82,岩性主要为中-细粒白云岩,镜下可见较脏的晶面、雾心亮边等特征(图2)。样品稀土元素配分曲线、特征参数与塔里木盆地下古生界埋藏白云岩具有很大的相似性^[2,4,11],即轻稀土亏损、重稀土富集,可进一步推测其为埋藏白云化成因(图5b)。

埋藏成岩环境可进一步细分为浅埋藏环境和深埋藏环境。黄思静等^[3]将浅埋藏环境的深度下限定义为600~1 000 m。压溶现象常被看作是进入深埋藏环境的重要标志。米兰1井镜下可见缝合线切割白云石颗粒(图2c),显示埋藏白云岩不会超过大量缝合线发育的600~1 000 m, δEu 负异常也指示较低温度的成岩环境,以上说明白云石化主要发生在浅埋藏环境。白云化流体可能为盆内蒸发岩间封存的海源性流体或压实流体,这些流体通过断层和渗透层向上运移使中-

上寒武统白云石化^[6,12]。依据塔东地区埋藏演化史^[12],可进一步确定浅埋藏白云化主要发生在中-晚奥陶世。

5.3 δEu 正异常型样品

还原性的酸性热液常以显著的 δEu 正异常为特征^[21],因此 δEu 正异常是判别白云岩是否受热液改造的重要依据^[2,4,11-12,18,24]。图4b中样品 δEu 均为正异常,同时岩石学特征表明其大多为粗粒白云岩,具波状消光、曲面-它形晶等特征(图2),部分还有典型热液矿物硅质组分(图2)及黄铁矿等,说明这些样品均受到了较强的热液改造(图5b)。稀土配分曲线为右倾型, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均为2.34,表现出轻稀土富集、重稀土亏损特征,也与塔里木盆地下古生界热液白云岩有很大的相似性^[2,4,11]。同时塔东地区寒武纪-白垩纪发生多次构造热事件,据邵红梅等^[24]认为塔东地区热液白云岩的形成时间可能为中-晚奥

陶世和(或)二叠纪末。

5.4 δEu 无异常型样品

图4c中样品 δCe 和 δEu 均基本无异常,表明白云化环境不具氧化、埋藏、高温的特点。配分曲线近水平,与古城地区泥晶灰岩配分曲线相似^[11,13],说明其白云化流体为同期的浓缩海水。样品岩性主要为泥粉晶白云岩和粉-细晶白云岩,晶粒细小、它形晶为主,晶面较脏(图2),这些特征均说明其可能形成于回流渗透机制(图5a)。蒸发泵形成部分白云岩后,剩余的富含镁离子的浓缩海水继续向下、侧向运动,交代早期灰岩,形成细粒的回流渗透白云岩,其白云化深度为毛细管作用的最大深度,白云化时间为中-晚奥陶世以前。

综上所述,米兰1井寒武系白云岩的形成环境和作用流体等比较复杂(图5),干热的气候、较浅的水体以及海平面频繁波动使蒸发作用强烈,形成富镁离子的蒸发浓缩海水,使部分刚沉淀的文石白云化。浓缩海水继续向下运动,使早期灰岩白云化。随着埋藏深度的增加,温度逐渐升高还原性增强,逐渐形成中-细粒的埋藏白云岩,绝大多数白云岩在同生/准同生阶段已经生成^[25]。后期,盆地深部热液沿断层和渗透层向上运动,使原岩再次发生改造。

6 白云岩储层形成模式

6.1 储层类型

根据岩心、普通薄片和铸体薄片观察,米兰1井寒武系储层岩性以泥粉晶白云岩和细晶白云岩为主,储集空间主要为孔隙和裂缝。其中,原生孔隙比例较小^[26],主要为泥粉晶白云岩和细晶白云岩中发育的原生晶间孔。次生孔隙比例较大^[26],主要为晶间孔、晶间溶孔、晶内溶孔和溶蚀孔洞等^[14],其中以前两者为主。晶间溶孔广泛分布于各种白云岩中,是热液和有机酸等溶蚀作用的结果。米兰1井裂缝体系较发育,主要包括构造缝、溶蚀缝和成岩缝,尤以构造缝为主,然而大多被鞍形白云石、方解石、玉髓和沥青等半充填-充填,显著的降低了白云岩的缝孔率。溶蚀缝大多为热液对原有的缝合线和构造缝溶蚀改造而成,形状大多不规则,部分被沥青充填。物性特征方面,43块样品孔、渗分析表明,白云岩孔隙度平均为0.91%,72%的样品孔隙度小于1.0%;渗透率平均为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,70%样品渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔低渗储层。但储层纵向集中,总厚度和单层厚度均较大,

横向也较稳定,总体评价为中等储层。

6.2 储层形成模式

上寒武统白云石化作用表现为与沉积环境相关的同生/准同生成因为基础、早成岩浅埋藏流体和晚成岩热液流体进行改造的特点,形成了以晶间孔和晶间溶孔为主的储集空间。白云岩储层的形成受多种条件的控制,其中有利的沉积环境是储层形成的先决条件,大规模白云石化是储层形成的基石,裂缝体系对储层有多重影响,而溶蚀作用是储层形成的关键。

6.2.1 台地边缘相是白云岩储层发育的有利区域

研究表明,寒武纪米兰地区位于罗西局限台地^[9]的边缘,上寒武统主要发育台地边缘沉积(图1)。白云岩的发育与沉积水体密切相关^[15]。当相对海平面较低时,蒸发作用强烈导致局部地区形成高盐度卤水,进而使刚沉积的文石发生白云石化。同时,相邻的罗西局限台地也能提供大量的高盐度卤水,这些卤水向下渗流,有利于回流渗透白云岩的发育^[27]。所有测试的样品均受到了蒸发作用或回流渗透作用的影响(图4),说明蒸发作用及高盐度卤水渗流对白云石化作用显著。

而与之相对比的中寒武统和下奥陶统主要发育陆棚相,远离局限台地,岩性以灰岩为主(图1)。实际上,在塔东地区,沉积相带对白云岩的发育具有一定的控制作用,两者具有很好的对应关系,台地及台地边缘相区更有利于白云岩或较纯白云岩的发育,斜坡相区表现为泥云岩与较纯白云岩的间互发育,盆地相区则主要发育泥岩、硅质岩和泥灰岩。

6.2.2 白云石化对储集空间的形成具有双重作用

前人关于白云石化对储层发育的影响已经进行了大量研究^[2,16,26-32],往往认为白云石化作用能够改善储层物性^[14-15,30,33],特别是在埋藏环境的封闭体系中^[31],白云石交代方解石能导致矿物体积减小、孔隙度增加。但也有人认为白云石化对孔隙形成的直接贡献有所夸大^[2,28],不能完全证明白云石化具有显著的增孔或减孔效应^[32],规模白云岩储层的孔隙主要来自于对原生孔隙的继承和溶蚀^[2,28]。白云石化对孔隙具有破坏、保持或强化作用^[16]。

对米兰1井来说,白云石化对储层的形成有建设^[15]和破坏两方面的作用^[2,28-29],且破坏作用显著。前文分析和薄片观察显示,寒武系灰岩发生了长时间、

多类型和多期次的白云石化,白云石交代方解石,矿物体积减小,新生成微孔隙或扩大了已存在的微孔隙。图2b为埋藏环境重结晶形成的白云岩,由于晶体增大,晶体间产生众多微孔隙。图2f为热液流体形成的白云岩,由于晶体的生长,在晶体间形成了大量的孔隙,造成晶体间点接触或线接触。而白云石化对储层的破坏作用主要表现为白云石在孔隙间的沉淀。鞍状白云石的沉淀肯定是破坏孔隙的^[28]。如果富镁流体供应充足,在原岩白云石化后,可能发生过度白云石化或者白云石的胶结作用^[17],在孔隙和裂缝中沉淀白云石。例如图2j显示原岩经热液白云石化后,在裂缝中继续沉淀鞍形白云石,导致裂缝被完全充填。

6.2.3 断裂有助于储层的形成

断裂往往与成岩作用、储层形成演化、油气成藏有着密切的关系。根据塔里木盆地构造演化和塔东低凸起地层发育特征^[10],其断裂演化受控于阿尔金-车尔臣断裂系统的控制,主要呈NW,NWW,NE三组走向,平面上具带状展布,整体显示“南北分带、东西分区”的特征^[10]。

区内断裂系统对储集空间的影响主要有4个方面:①Davies和Smith^[34]认为热液流体在张性断层和基底大断裂等构造部分特别发育,因此阿尔金-车尔臣岩石圈大断裂及其次级断裂能成为热液活动的重要通道和场所。区内断裂系统为深部热液上涌提供了通道,从而加热了断裂及其临近地层,有利于克服白云石沉淀的热力学障碍,促进白云岩(石)的形成;②热液流体沿裂缝系统对原岩进行选择性地改造,不仅能促使白云岩的形成,还能形成新的储渗空间(图2k)^[2,4,6,12,24-25,29,35],增加缝孔率,更能扩大热液的分布范围,促使白云石化在更大范围内发生;③地层中的有机酸沿高渗透层或裂缝系统对地层进行溶蚀,同样能增加地层的储集性能(图2l),还能形成新的溶蚀缝洞,扩大有机酸的侵蚀范围;④断裂体系的形成时间对油气赋存有重要影响,加里东期形成的断裂与油气大量生成和运移有很好的匹配关系,对于古油藏的形成有重要意义,然而现今这些储集空间大多被沥青充填,燕山期和喜马拉雅期形成的断裂体系才有助于现今的油气藏的形成。

6.2.4 溶蚀作用显著扩大了储集空间

根据岩心和薄片观察,认为米兰1井寒武系白云岩溶蚀作用主要包括热液溶蚀和有机酸溶蚀,溶蚀作

用是储层形成的重要机制。

前人对塔东地区寒武系-奥陶系热液白云岩化进行了诸多研究^[2,4,6,12,24-25,29,35-38],认为该区可能存在多期多次的热液作用^[11,24],作用时间主要为奥陶纪-志留纪、二叠纪^[24],并对储层的形成有重要的控制作用^[2,14,15,28]。石英、黄铁矿、天青石、鞍形白云岩、钠长石等典型矿物^[11,24],不规则缝洞及其内部白云石、方解石的多期次生长,都可能代表了明显的热液作用(图2d,h)。热液溶蚀的横向影响有限,主要集中于断裂带附近^[39]。此外,下古生界巨厚的碳酸盐岩是塔里木盆地重要的烃源岩,有机质演化过程中形成的大量有机酸随流体沿断层、裂缝、缝合线和高渗层等运移,对白云石和方解石进行溶蚀,也能导致孔隙度增加。晶体边缘因受溶蚀而参差不齐和孔缝中的沥青充填是有机酸溶蚀的显著标志(图2l)。实际上,有机酸溶蚀作用在塔里木盆地白云岩中广泛发育^[26,28-29]。

7 结论

1) 根据稀土元素配分特征,塔东地区米兰1井寒武系白云岩可分为3种类型:δEu负异常型、δEu正异常型和δEu无异常型。

2) 米兰1井寒武系白云岩的成因多样,包括蒸发白云化、埋藏白云化、热液白云化和回流渗透白云化。

3) 白云岩储层的形成受多种条件的控制,其中有利的沉积环境是储层形成的先决条件,大规模白云石化是储层形成的基石,裂缝体系对储层有多重影响,而溶蚀作用是储层形成的关键。

参 考 文 献

- [1] 王招明,杨海军,齐英敏,等.塔里木盆地古城地区奥陶系天然气勘探重大突破及其启示[J].天然气工业,2014,34(1):1-9.
Wang Zhaoming, Yang Haijun, Qi Yingmin, et al. Ordovician gas exploration breakthrough in the Gucheng Lower uplift of the Tarim Basin and its enlightenment[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 1-9.
- [2] 赵文智,沈安江,胡素云,等.塔里木盆地寒武-奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J].岩石学报,2012,28(3):758-768.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Types and distributional features of Cambrian-Ordovician dolostone reservoirs in Tarim Basin, northwestern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 758-768.
- [3] 黄思静.碳酸盐岩的成岩作用[M].北京:地质出版社,2010:177-180.
Huang Sijing. Carbonate diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 177-180.

- [4] 郑剑锋,沈安江,刘永福,等.塔里木盆地寒武-奥陶系白云岩成因及分布规律[J].新疆石油地质,2011,32(6):600-604.
Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Genesis and distribution of the Cambrian-Ordovician dolomite in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(6): 600-604.
- [5] 陈代钊,张艳秋,周锡强,等.塔里木盆地西缘上寒武统下丘里塔格群热液白云岩改造时限:来自古地磁的约束[J].石油与天然气地质,2020,41(1):50-58.
Chen Daizhao, Zhang Yanqiu, Zhou Xiqiang, et al. Timing of hydrothermal alteration on the Lower Qiulitag Group dolomites of the Upper Cambrian, western margin of Tarim Basin: Palaeomagnetic constraint[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 50-58.
- [6] 黄擎宇.塔里木盆地中央隆起区寒武-奥陶系白云石化作用及白云岩储层成因研究[D].四川成都:成都理工大学,2014.
Huang Qingyu. Dolomitization and origin of the Cambrian-Ordovician dolomite reservoirs in the Central Uplift, Tarim[D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2014.
- [7] 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):1-9.
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): 1-9.
- [8] 胡文瑄,朱井泉,王小林,等.塔里木盆地柯坪地区寒武系微生物白云岩特征、成因及意义[J].石油与天然气地质,2014,35(6):860-869.
Hu Wenxuan, Zhu Jingquan, Wang Xiaolin, et al. Characteristics, origin and geological implications of the Cambrian microbial dolomite in Keping area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 860-869.
- [9] 赵宗举,罗家洪,张运波,等.塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理[J].石油学报,2011,32(6):37-48.
Zhao Zongju, Luo Jiahong, Zhang Yunbo, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(6): 37-48.
- [10] 冯子辉,李强,张亚金,等.古城低凸起奥陶系油气成藏条件与分布规律[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):87-93.
Feng Zihui, Li Qiang, Zhang Yajin, et al. Accumulating conditions and distribution laws of Ordovician hydrocarbon in Gucheng Low Uplift[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 87-93.
- [11] 郭春涛,李德武,陈树民.塔里木盆地古城地区上寒武统白云岩稀土元素地球化学特征及成因模式[J].石油实验地质,2017,39(5):666-674.
Guo Chuntao, Li Dewu, Chen Shumin. Geochemical characteristics and genetic model of rare earth elements in the Upper Cambrian dolomites in Gucheng area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(5): 666-674.
- [12] 郑见超,李斌,刘羿伶,等.塔里木盆地寒武统玉尔吐组烃源岩热演化模拟分析[J].油气藏评价与开发,2018,8(6):7-12.
Zheng Jianchao, Li Bin, Liu Yiling, et al. Study on thermal evolution modeling of lower Cambrian Yuertusi source rock, Tarim Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(6): 7-12.
- [13] 刘策,张义杰,李洪辉,等.塔里木盆地古城地区中下奥陶统白云化流体性质厘定-来自稀土元素的证据[J].矿物岩石地球化学通报,2017,36(4):602-610.
Liu Ce, Zhang Yijie, Li Honghui, et al. Nature of dolomitizing fluids of Middle-Low Ordovician dolomites in the Gucheng area, Tarim Basin: Evidence from rare earth elements geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(4): 602-610.
- [14] 邵龙义,韩俊,马峰,等.塔里木盆地东部寒武系白云岩储层及相控特征[J].沉积学报,2010,28(5):953-961.
Shao Longyi, Han Jun, Ma Feng, et al. Characteristics of the Cambrian dolomite reservoirs and their facies controlling in Eastern Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 953-961.
- [15] 刘永福,殷军,孙雄伟,等.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, et al. Cambrian sedimentary characteristics and origin of high-quality dolomite reservoirs in eastern Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 126-132.
- [16] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/3):1-81.
- [17] 赵文智,沈安江,乔占峰,等.白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J].石油勘探与开发,2018,45(6):909-921.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. The genetic types and distinguished characteristics of dolostone and the origin of dolostone reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 909-921.
- [18] 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.
- [19] 赵宗举,吴兴宁,潘文庆,等.塔里木盆地奥陶纪层序岩相古地理[J].沉积学报,2009,27(5):39-56.
Zhao Zongju, Wu Xingning, Pan Wenqing, et al. Sequence lithofacies paleogeography of Ordovician in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 39-56.
- [20] Bau M, Dulski P. Distribution of Yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman Iron-formations, Transvaal supergroup, South Africa[J]. Precambrian Research, 1996, 79: 37-55.
- [21] Frimmel H E. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator[J]. Chemical Geology, 2009, 258: 338-353.
- [22] Haas J R, Shock E L, Sassani D C. Rare earth elements in hydrothermal systems: estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(21): 4329-4350.
- [23] Webb G E, Kamber B S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: A new shallow seawater proxy[J]. Geochimica et Cosmo-

- chimica Acta, 2000, 64: 1557 – 1565.
- [24] 邵红梅, 卢曦, 李国蓉, 等. 热液作用对塔东地区寒武系碳酸盐岩储集层的影响[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(3): 277 – 282.
- Shao Hongmei, Lu Xi, Li Guorong, et al. Hydrothermal process and its effect on Cambrian carbonate reservoirs in Tadong area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(3): 277 – 282.
- [25] 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 深埋藏阶段白云石化作用及其对储层的影响——以塔里木盆地地下古生界白云岩为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(5): 772 – 779.
- Liu Wei, Huang Qingyu, Wang Kun, et al. Dolomitization and influence on reservoir development in deep-burial stage: A case study of Lower Paleozoic in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(5): 772 – 779.
- [26] 朱井泉, 吴仕强, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 67 – 79.
- Zhu Jingquan, Wu Shiqiang, Wang Guoxue, et al. Types and porosity characteristics of the Cambrian-Ordovician dolostones in Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 67 – 79.
- [27] 胡广成, 鲍志东, 刘桂珍, 等. 黔北地区下三叠统茅草铺组白云岩成因[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(2): 9 – 14.
- Hu Guangcheng, Bao Zhidong, Liu Guizhen, et al. Origins of the dolomite in Lower Triassic Maocaopu Formation of North Guizhou[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(2): 9 – 14.
- [28] 赵文智, 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(9): 1925 – 1939.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. The porosity origin of dolomite reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(9): 1925 – 1939.
- [29] 沈安江, 郑剑锋, 潘文庆, 等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层类型及特征[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4): 1 – 9.
- Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Pan Wenqing, et al. Types and the characteristics of Lower Paleozoic dolomite reservoirs in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(4): 1 – 9.
- [30] 刘波, 朱翀, 张正红, 等. 塔中地区上奥陶统良里塔格组白云石化作用成因机理[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 37 – 47.
- Liu Bo, Zhu Chong, Zhang Zhenghong et al. Genetic mechanism of dolomitization in the Upper Ordovician Lianglitage Fm in the Central Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 37 – 47.
- [31] 曾臻, 屈大鹏, 李文成, 等. 涪陵地区茅口组热液白云岩储层预测研究[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(6): 38 – 42.
- Zeng Zhen, Qu Dapeng, Li Wencheng, et al. Prediction of hydrothermal dolomite reservoirs in Maokou formation in Fuling area[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(6): 38 – 42.
- [32] 任影, 钟大康, 高崇龙, 等. 川东寒武系龙王庙组白云岩地球化学特征、成因及油气意义[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1102 – 1115.
- Ren Ying, Zhong Dakang, Gao Chonglong, et al. Geochemical characteristics, genesis and hydrocarbon significance of dolomite in the Cambrian Longwangmiao formation, eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1102 – 1115.
- [33] 陈思聪, 傅恒. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层发育主控因素[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(4): 1 – 4.
- Chen Sichong, Fu Heng. Main factors affecting the development of Ordovician carbonate-rock reservoirs, Central Tarim Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2015, 38(4): 1 – 4.
- [34] Davies G R, Smith L B JR. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641 – 1690.
- [35] 王晓丽, 林畅松, 焦存礼, 等. 塔里木盆地中上寒武统白云岩储层类型及发育模式[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 63 – 74.
- Wang Xiaoli, Lin Chuangsong, Jiao Cunli, et al. Dolomite reservoir types and development models of Middle-Upper Cambrian in Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(1): 63 – 74.
- [36] 程丽娟, 李忠, 刘嘉庆, 等. 塔里木盆地巴楚—塔中地区寒武系盐下白云岩储层成岩作用及物性特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 316 – 327.
- Cheng Lijuan, Li Zhong, Liu Jiaqing, et al. Diagenesis and physical properties of subsalt dolomite reservoirs of the Cambrian, Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 316 – 327.
- [37] 孙海涛, 张玉银, 柳慧林, 等. 四川盆地东部下寒武统龙王庙组白云岩类型及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 318 – 329.
- Sun Haitao, Zhang Yuyin, Liu Huilin, et al. Typological analysis and genetic mechanism of dolomite in the Lower Cambrian Longwangmiao formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 318 – 329.
- [38] 朱可丹, 张友, 林彤, 等. 基于 CT 成像的白云岩储层孔喉非均质性分析——以塔东古城地区奥陶系 GC601 井鹰三段为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 862 – 873.
- Zhu Kedan, Zhang You, Lin Tong, et al. Pore-throat heterogeneity in dolomite reservoirs based on CT imaging: A case study of the 3rd member of the Ordovician Yingshan Formation in Well GC601 in Gucheng area, eastern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 862 – 873.
- [39] 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 塔里木盆地巴楚地区寒武系储层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(6): 982 – 993.
- Huang Qingyu, Hu Suyun, Pan Wenqing, et al. Characteristics and controlling factors of the Cambrian carbonate reservoirs in Bachu area, Tarim Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(6): 982 – 993.

(编辑 张玉银)