

郭春涛,刘亮,倪玲梅,等.塔里木盆地米兰低凸起寒武系白云岩成因:来自米兰1井的指示.吉林大学学报(地球科学版), 2025,55(1):57-69. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230082.

Guo Chuntao, Liu Liang, Ni Lingmei, et al. Origin of Cambrian Dolomite in Milan Low Uplift, Tarim Basin: An Indication from Well Milan 1. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 57-69. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230082.

塔里木盆地米兰低凸起寒武系白云岩成因 ——来自米兰1井的指示

郭春涛^{1,2}, 刘亮^{1,2}, 倪玲梅³, 史江涛^{1,2}, 田朋飞^{1,2}, 荆雪婷^{1,2}

1. 矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省重点实验室培育基地, 山西 阳泉 045097

2. 山西工程技术学院地球科学与工程系, 山西 阳泉 045097

3. 曲靖师范学院文化旅游学院, 云南 曲靖 655011

摘要:塔里木盆地塔东地区米兰低凸起寒武系—奥陶系发育厚层白云岩,然而该区白云岩成因机理研究相对薄弱,严重制约了深层油气勘探的进展。针对上述问题,本文以该区典型井米兰1井为例,在岩心和薄片观察基础上,对30件白云岩样品的稀土元素特征进行了分析。结果表明:所有样品稀土元素北美平均页岩(NASC)配分模式可分为 δCe 负异常型、 δEu 负异常、 δEu 强正异常、 δEu 正异常型和“V”字型五类;大部分样品 δCe 均为负异常,表明大部分白云岩都曾经受蒸发泵白云岩化作用的影响,同时许多样品也表现出多样的 δEu 异常和配分特征,表明许多白云岩后期受到埋藏流体或(和)多期热液流体的改造;晶粒细小的白云岩主要是蒸发泵作用形成的,晶粒较大的白云岩可能形成于埋藏或多期热液环境,硅质白云岩大多受到了热液的再作用。

关键词:塔里木盆地;塔东地区;米兰1井;寒武系;白云岩;稀土元素;地球化学

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230082

中图分类号:P595; TE122

文献标志码:A

Origin of Cambrian Dolomite in Milan Low Uplift, Tarim Basin: An Indication from Well Milan 1

Guo Chuntao^{1,2}, Liu Liang^{1,2}, Ni Lingmei³, Shi Jiangtao^{1,2}, Tian Pengfei^{1,2}, Jing Xueting^{1,2}

1. The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization, Yangquan 045097, Shanxi, China

2. Department of Earth Sciences and Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045097, Shanxi, China

3. Faculty of Culture and Tourism, Qujing Normal University, Qujing 655011, Yunnan, China

Abstract: The origin of dolomite is a key problem in Cambrian-Ordovician exploration in Tadong area of Tarim basin. In view of the above problem, the rare earth element (REE) characteristics of 30

收稿日期:2023-04-04

作者简介:郭春涛(1981—),男,副教授,博士,主要从事沉积学方面的研究,E-mail:xinylx521@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41802171);山西省高等学校科技创新项目(2021L590);山西省基础研究计划项目(202203021211287)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41802171), the Science and Technology Innovation Project of Colleges and Universities in Shanxi Province (2021L590) and the Fundamental Research Program of Shanxi Province (202203021211287)

dolomite samples from Well Milan 1 were analyzed based on the observation of cores and thin sections. The results show that the NASC normalized REE distribution patterns of all samples can be classified into five types: the type of δCe negative anomaly, the type of δEu negative anomaly, the type of δEu strong positive anomaly, the type of δEu positive anomaly, the type of “V” shape. Further study found that the δCe of most samples is negative abnormal, indicating that most dolomites have been affected by evaporation pump dolomitization, and many samples also show diverse δEu anomalies and distribution characteristics, indicating that many dolomites were transformed by buried fluids or (and) multiphase hydrothermal fluids in the late stage. Among them, dolomite with fine grains is mainly formed by an evaporation pump, and dolomite with large grains may be formed in a buried or hydrothermal environment, while siliceous dolomite is mostly subjected to a hydrothermal reaction.

Key words: Tarim basin; Tadong area; Well Milan 1; Cambrian; dolomite; rare earth element; geochemistry

0 引言

塔里木盆地寒武系—奥陶系发育上千米的白云岩,其一直是深层勘探的重点层位^[1-3]。2012年在塔东地区古城6井下奥陶统获得高产气流,揭开了塔东地区白云岩油气藏勘探的序幕^[1];后又在中深1、古城8、古城9井获得重要发现^[2,4],证实了白云岩储层勘探的广阔前景。但是,在寒武系白云岩油气藏勘探中,仍然有许多关键问题,如地层埋深大、地震品质差、岩性识别及分布预测困难等^[2],这些问题严重制约了塔东地区深层勘探步伐。

要预测白云岩层时空展布,首先要搞清楚白云化流体的来源和性质。前人^[3-23]对塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地等地白云岩的成因进行了诸多研究,其中对塔里木盆地,研究工作主要集中于塔中^[13,21]、巴楚^[15]、塔北^[9,16]、古城^[4-5,7,14]、塔东^[6,17-19]、柯坪^[10,12,20]等地区的白云岩成因、环境、储层、孔隙等方面,并相继提出了蒸发泵^[4-7,13,17]、回流渗透^[13,16]、深水回流^[19]、埋藏^[4-7,13-14,17]、热液^[4-7,13-14,16-18]、混合水^[4,21]、微生物^[12,20]等模式用于解释盆地内白云岩的成因,不同模式的差别主要为流体的来源、性质、作用时间和期次等。

不同成因的白云岩具有不同的稀土元素组成、配分模式、特征参数等^[7],通过分析这些因素,有助于揭示白云岩成因,进而可用于预测白云岩储层的时空分布。运用稀土元素进行白云岩成因分析在塔里木盆地、四川盆地等地区已经取得良好的效果^[4-7,13-23]。为研究塔里木盆地塔东地区米兰低凸起白云岩的成因,本文基于米兰地区典型井米兰1井的岩石学观察,通过各类白云岩的全岩和微区稀土

元素地球化学特征分析,探讨米兰1井白云化流体的类型、性质、来源、通道和期次,以明确对白云岩成因机理的认识,加深对塔东地区白云岩成因的理解。

1 地质背景

塔东低隆起位于塔里木盆地东南部(图1a),呈NE—SW向展布,可划分为米兰低凸起、罗布泊凸起等多个三级构造单元^[6-7](图1a)。米兰低凸起位于罗布泊凸起西南部,为车尔臣断裂带下盘的一个断背斜潜山带。米兰1井位于米兰构造带东部的米兰4号构造上。

岩相古地理特征方面^[24-25],晚寒武世—早中奥陶世塔里木盆地总体表现为台盆相间格局,塔东的大部和满加尔坳陷主体为深水盆地环境,而塔东的东部则发育罗西台地^[24-25]。随着周缘大洋的逐渐闭合,中晚奥陶世早期塔东地区水体逐渐加深,后期则逐渐被来源于周缘造山带的碎屑物质填满。

具体到米兰低凸起:早寒武世西大山组主要为深水盆地环境^[26-27],岩性主要为泥岩、硅质泥岩等;中寒武世,随着罗西台地逐渐扩大和海平面的持续下降,莫合尔山组主要为一套陆棚、斜坡相沉积^[26-27],米兰地区此时位于罗西台地之外,为一套浅水陆棚沉积^[26-27],岩性以含泥(含云)灰岩、灰岩、泥灰岩为主;晚寒武世—早奥陶世,米兰低凸起水体继续变浅,突尔沙克塔格组主要为一套台地相、台地边缘、台缘斜坡相沉积,岩性主要为灰岩、白云岩及其过渡岩性;早—中奥陶世受周缘大洋俯冲闭合的影响^[28],盆地内经历了快速的海进过程,黑土凹组岩性以黑色泥岩为主,代表其为一套深水盆地相沉积^[26-27];晚奥陶世受周缘造山带的影响,陆源碎屑

逐渐增多,却尔却克组发育一系列海底扇,水体逐渐变浅(图 1b)。志留纪之后,周缘古大洋相继闭合造山^[28],米兰低凸起整体抬升并遭受剥蚀,使侏罗系与奥陶系相接触。

2 岩石学特征

米兰 1 井寒武系下统泥质含量高,以泥岩、含泥白云岩、泥质白云岩、白云岩、云质灰岩、含泥灰岩等为主;寒武系中统白云岩含量较高,以中厚层—巨厚层状含泥白云岩、泥质白云岩、白云岩、云质灰岩、泥质灰岩等为主;寒武系上统灰岩含量较高,以中厚层—巨厚层状含泥灰岩、泥质灰岩、云质灰岩、灰岩、灰质白云岩为主^[26](图 1b)。

米兰 1 井中上部白云岩以结晶白云岩为主,基本不发育颗粒白云岩。过渡岩类较多,多以灰质(含灰)白云岩、云质(含云)灰岩为主,部分岩石也含有少量的泥质,说明白云化作用较不彻底,与塔东低隆起古城地区寒武系白云岩特征相似^[4]。根据晶体粒

度大小,可分为泥微晶白云岩、晶粒白云岩,在部分裂缝、溶洞中可见鞍形白云石。按照晶体表面自形程度、干净程度、含有物、晶粒大小等特征可将白云岩进一步细分,见图 2。

泥微晶白云岩晶体多呈他形(图 2a、b),极少自形,结构均一,晶体表面大多较脏,岩石具镶嵌结构。白云石晶间可见有机质、泥质、黄铁矿、沥青,部分显示纹层状构造。镜下可见构造缝、溶蚀缝(图 2b),部分被方解石、白云石、硅质、泥质、有机质等充填或半充填。岩石致密,缝洞多被充填,极少发育有效孔隙。

晶粒白云岩分布较多,包括微—细晶白云岩(图 2c)、细—中晶白云岩(图 2d、e)、中晶白云岩(图 2f)、中—粗晶白云岩(图 2g、h)。此类白云岩中,晶粒越小,自形程度越差。较自形白云石表面干净(图 2g、h),局部具波状消光。部分样品镜下可见雾心亮边结构(图 2f、g、h)。部分构造缝、晶间孔、溶蚀孔等被泥质、方解石、沥青、硅质充填(图 2c、d、g、h),硅质多呈斑块状顺层分布,局部富集(图 2c、d),

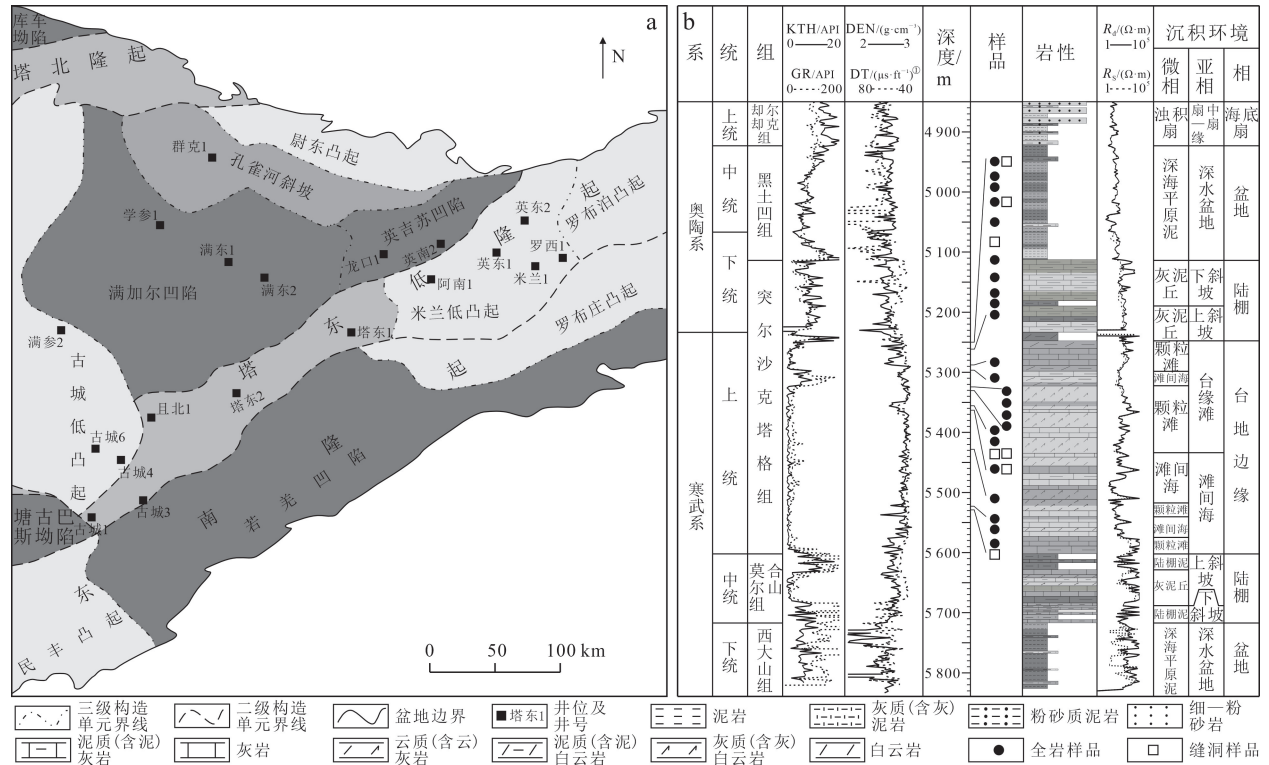


图 1 塔东地区位置简图(a)及米兰 1 井柱状图(b)

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

①英尺(ft)为非法定计量单位:1 ft=304.8 mm.

较多薄片下都可观察到硅质分布。局部白云石发生硅化。部分样品中可见粗粒白云石与细粒白云石具双众数特征(图 2e),暗示着重结晶的影响。

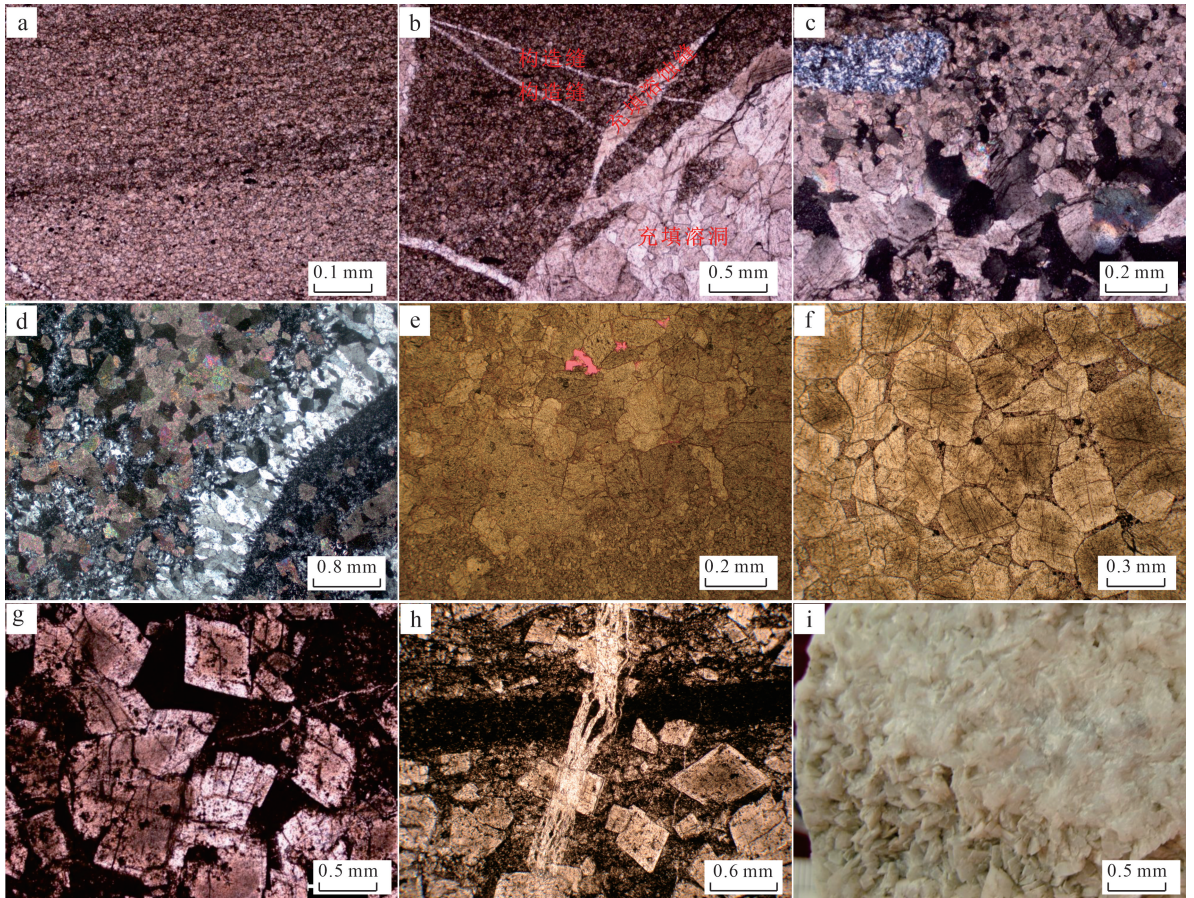
鞍形白云石为多为热液产物,晶体以自形为主,晶面多发生弯曲(图 2b),波状消光,常伴有热液产物,如石英、方解石、沥青等。薄片,鞍形白云石常充填于较大的孔洞或缝隙中(图 2b、c)。岩心上,鞍形白云石多呈白色巨晶状(图 2i)。

3 样品与实验

本文主要针对塔东地区米兰 1 井上寒武统突尔沙克塔格组白云岩样品进行全岩和微区稀土元素地

球化学测试。所有样品均取自台地边缘的颗粒滩微相,没有深海平原的样品。(图 1b)。在满足测试要求的前提下,随机挑选,其中,泥微晶白云岩样品 3 件,细晶白云岩样品 7 件,中晶白云岩样品 7 件,粗晶白云岩样品 2 件,硅质白云岩样品 4 件,缝洞白云石样品 3 件,缝洞方解石 4 件,共 30 件样品。总体上,泥微晶白云岩、硅质白云岩和缝洞充填物样品自下而上均有分布,细晶白云岩样品主要分布于取样段中下部,中晶、粗晶白云岩样品主要分布于取样段上部。

在取样之前,应先对岩心进行仔细观察和镜下鉴定,挑选无明显杂质的白云岩样品^[29-30]。样品制备过程中,首先用玛瑙钵将样品研磨至 75 μm 以下,



a. 5 355.82 m, 泥微晶他形白云岩, 晶粒极细小, 较均匀, 具纹层状构造; b. 5 251.60 m, 泥微晶他形白云岩, 不规则缝洞内见鞍形白云石充填; c. 5 355.74 m, 微—细晶他形白云岩, 镶嵌接触, 局部见硅质充填, 不规则缝洞内见鞍形白云石, 波状消光明显; d. 5 324.74 m, 硅质细—中晶他形白云岩, 见硅化斑块, 呈石英或玉髓形式; e. 5 356.60 m, 细—中晶他形白云岩, 细粒白云石与中粒白云岩呈双众数特征, 发育晶间溶孔和晶内孔; f. 5 253.51 m, 中晶半自形白云岩, 表面较脏, 见雾心亮边结构, 晶间孔发育, 部分被沥青充填; g. 5 254.45 m, 中—粗晶半自形—自形白云岩, 线接触, 晶体表面较干净, 见雾心亮边结构, 晶间孔、溶蚀孔部分被沥青充填; h. 5 253.36 m, 中—粗晶半自形—自形白云岩, 点接触, 晶体表面较干净, 见雾心亮边结构, 见溶蚀缝被白云石充填, 见构造缝被泥质充填, 晶体大小悬殊; i. 5 524.29 m, 鞍形白云石, 白云石呈巨晶状, 岩心标本。

图 2 米兰 1 井寒武系白云岩显微特征

Fig.2 Microscopic features of Cambrian dolomite in Well Milan 1

然后用盐酸除去碳酸盐岩,再用 HF 酸溶解样品,最后送至南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室。使用 Finnigan MAT Element II 型高精度电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS 进行样品稀土元素测试,分析精度高于 $\pm 5\%$ 。测试结果均采用北美平均页岩(NASC)^[31]的稀土元素值进行标准化。

4 白云岩稀土元素地球化学特征

全岩分析时,白云岩中往往含有不等量的黏土、黄铁矿等杂质,会造成稀土元素(REE)质量分数显著增大。样品 ML1-01 的 REE 质量分数为 211.3530×10^{-6} ,远高于其他样品,也明显高于塔北、塔东、塔中、柯坪、古城等地区白云岩 REE 质量分数^[4-7, 12-21],因此该样品仅做参考使用。

4.1 稀土元素总量

样品稀土元素测试结果见表1。从测试结果可以看出,不同类型白云岩稀土元素总质量分数差别明显。除 ML1-01 样品外,各类白云岩稀土总质量分数($w(\sum \text{REE})$)为 $(2.5090 \sim 80.9336) \times 10^{-6}$ (图3a),平均值为 23.9767×10^{-6} 。其中泥微晶白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩 $w(\sum \text{REE})$ 平均值分别为 45.8769×10^{-6} 、 12.7712×10^{-6} 、 12.0872×10^{-6} (图3a);表明白云化过程中稀土元素发生显著迁移贫化,与准同生及埋藏白云化过程中稀土元素具有强烈的迁移贫化的特征相一致^[22],说明较细粒白云岩可能形成于准同生或埋藏环境。

粗晶白云岩 $w(\sum \text{REE})$ 平均值为 39.0255×10^{-6} ,硅质白云岩 $w(\sum \text{REE})$ 平均值为 30.6742×10^{-6} ,整体上明显高于其他白云岩。只有稀土元素质量分数明显偏高的外来流体才能改变原岩的稀土元素质量分数^[15]。自然界大部分流体中的稀土元素质量分数均非常低,而热液中含有较高的稀土元素总量,较低的水岩比就能使岩石中稀土元素总量增加^[15];因此,可能有热液参与了这些岩石的白云化过程。

4.2 轻稀土和重稀土元素特征

不同类型白云岩样品轻重稀土质量分数不同,总体上 $w(\sum \text{HREE})$ 与 $w(\sum \text{LREE})$ 线性关系不明显(图3b)且分成明显的两部分,说明其经历的成岩环境、白云化过程差异明显。其中:细晶白云岩、中晶白云岩、粗晶白云岩、硅质白云岩的轻重稀土质量分数之比平均值为 8.7812、14.0062、21.4321、16.0599,表明随着白云化程度的增加,重稀土迁移

贫化明显;而泥微晶白云岩轻重稀土元素质量分数之比变化较大(图3b),说明其白云化过程可能与其他白云岩有差异。

4.3 元素 Ce 和 Eu 异常

因元素性质差异,在不同的流体环境中,Ce 和 Eu 常呈现不同的性质进而出现异常,从而能提供成岩环境方面的信息^[32-33]。根据 $\delta \text{Ce} - \delta \text{Pr}$ 图解(图3c),大部分白云岩样品 δPr 大于 1.0, δCe 小于 1.0,表明样品的 δCe 负异常、 δLa 正异常的特征是确实存在的^[34]。

研究区大部分样品具有 δCe 负异常特征,介于 0.64~1.21 之间(图3d),平均值为 0.83。不同粒度白云岩的 δCe 异常值范围大致一致,说明白云化过程中没有明显改变 δCe 。不同类型白云岩的 δEu 存在一定差别,整体介于 0.38~2.85 之间(图3d),平均值为 1.23,其中泥微晶白云岩 δEu 为 0.79~1.56,平均值为 1.06;细晶白云岩 δEu 为 0.38~2.85 之间,平均值为 1.12;中晶白云岩 δEu 为 0.97~2.53,平均值为 1.58;粗晶白云岩 δEu 为 1.23~1.32,平均值为 1.28;硅质白云岩 δEu 为 0.65~1.63,平均值为 1.00。上述特征表明每种类型白云岩均可能有多种成因。

4.4 REE 配分模式

不同的白云化流体具有不同的 REE 配分模式和特征参数,在不同流体中形成的岩石往往保留部分该流体的组分,因此可以通过其推断流体的性质和来源^[4-7, 13-21]。米兰1井白云岩稀土元素配分曲线可分为五类(图4)。

1) δCe 负异常型(图4a)。该类样品 δCe 弱负异常,介于 0.79~0.89 之间,平均值为 0.84; δEu 基本无异常,介于 0.93~1.09 之间,平均值为 1.00; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 0.79~3.99 之间,平均值为 1.78(表1),配分曲线为右倾型,表现出轻微的轻稀土富集、重稀土亏损特征。该类样品主要是泥微晶白云岩和细晶白云岩。

2) δEu 负异常型(图4b)。该类样品 δCe 弱负异常,介于 0.71~0.89 之间,平均值为 0.81; δEu 负异常,介于 0.38~0.90 之间,平均值为 0.71; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 0.15~2.45 之间,平均值为 0.97(表1),配分曲线为近水平型,表现出轻重稀土富集特征相似。该类样品主要是泥微晶白云岩和细晶白云岩。

3) δEu 强正异常型(图4c)。该类样品 δCe 弱负异常,介于 0.64~0.76 之间,平均值为 0.70; δEu 强正异常,介于 2.53~2.85 之间,平均值为 2.71; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 0.14~1.01 之间,平均值为 0.50(表

表1 研究区寒武系白云岩稀土元素分析结果

Table 1 Analysis results of rare earth elements of Cambrian dolomite in the study area

编号	深度/m	岩性	测试对象	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy	Ho	Er
ML1-01	5 250.04	细晶白云岩	缝洞白云石	50.204 0	119.916 0	9.010 0	23.112 0	3.442 0	1.200 0	0.378 0	1.695 0	0.313 0	0.963 0
ML1-02	5 250.04	细晶白云岩	全岩	2.920 0	4.876 0	0.666 0	2.475 0	2.511 0	1.421 0	0.309 0	0.694 0	0.071 0	0.486 0
ML1-03	5 250.94	泥微晶白云岩	全岩	16.458 3	33.007 6	4.448 5	16.995 1	3.358 9	0.618 1	0.387 9	2.373 6	0.528 6	1.403 6
ML1-04	5 251.60	泥微晶白云岩	全岩	7.226 7	13.549 6	1.769 3	6.145 9	1.334 7	0.242 9	0.159 8	1.061 7	0.251 9	0.666 2
ML1-05	5 252.78	硅质细—粗晶白云岩	缝洞方解石	11.309 0	19.593 0	2.264 0	7.565 0	1.185 0	0.284 0	0.182 0	0.850 0	0.162 0	0.497 0
ML1-06	5 252.78	细—中晶白云岩	全岩	8.145 0	14.357 0	1.692 0	5.748 0	1.270 0	0.401 0	0.147 0	0.691 0	0.137 0	0.407 0
ML1-07	5 253.40	粗晶白云岩	全岩	10.026 6	19.591 3	1.943 5	6.626 1	1.111 3	0.273 1	0.123 8	0.774 3	0.179 8	0.452 9
ML1-08	5 253.90	细—粗晶白云岩	缝洞方解石	8.345 0	15.641 0	1.523 0	4.153 0	0.865 0	0.218 0	0.097 0	0.549 0	0.101 0	0.296 0
ML1-09	5 254.34	粗晶白云岩	全岩	11.835 0	20.177 5	1.997 8	6.174 2	1.087 2	0.246 5	0.112 5	0.680 4	0.155 4	0.419 2
ML1-10	5 258.99	硅质中晶白云岩	全岩	8.933 1	12.445 0	1.232 5	4.003 6	0.644 4	0.093 5	0.072 1	0.592 1	0.160 3	0.604 3
ML1-11	5 260.07	细—中晶白云岩	全岩	0.737 0	1.375 0	0.250 0	1.076 0	1.854 0	1.108 0	0.325 0	0.735 0	0.083 0	0.609 0
ML1-12	5 260.20	泥微晶白云岩	全岩	3.439 0	7.277 8	1.019 1	3.922 1	0.687 2	0.094 7	0.062 8	0.383 5	0.083 9	0.231 5
ML1-13	5 260.86	细—中晶白云岩	全岩	3.393 7	6.073 6	0.698 0	2.580 4	0.478 0	0.105 3	0.046 1	0.320 0	0.072 2	0.201 8
ML1-14	5 289.22	粉—细晶白云岩	全岩	10.302 0	18.767 0	2.163 0	6.303 0	1.365 0	0.275 0	0.184 0	0.923 0	0.179 0	0.495 0
ML1-15	5 294.53	硅质泥微晶白云岩	全岩	7.105 0	12.800 0	1.552 0	5.688 0	1.123 0	0.367 0	0.155 0	0.780 0	0.143 0	0.426 0
ML1-16	5 324.49	中—细晶白云岩	全岩	1.843 0	3.707 0	0.520 0	2.264 0	0.514 0	0.117 0	0.084 0	0.452 0	0.093 0	0.266 0
ML1-17	5 324.74	硅质细—中晶白云岩	全岩	6.767 0	7.996 4	0.677 4	1.798 8	0.230 2	0.043 8	0.028 4	0.267 1	0.071 0	0.266 3
ML1-18	5 324.90	细晶白云岩	全岩	1.353 3	2.522 8	0.398 2	1.789 4	0.415 3	0.072 9	0.049 4	0.311 6	0.071 3	0.202 7
ML1-19	5 325.20	中—细晶白云岩	全岩	1.030 0	2.367 6	0.324 3	1.397 6	0.328 5	0.062 7	0.038 6	0.291 7	0.060 7	0.144 4
ML1-20	5 355.46	中晶白云岩	全岩	3.580 6	7.081 0	0.853 9	3.423 9	0.791 2	0.151 7	0.097 2	0.686 4	0.163 3	0.436 3
ML1-21	5 356.21	粉—细晶白云岩	全岩	2.042 0	3.219 0	0.409 0	1.763 0	0.368 0	0.078 0	0.069 0	0.355 0	0.076 0	0.216 0
ML1-22	5 356.49	粉—细晶白云岩	缝洞方解石	0.262 0	0.737 0	0.115 0	0.520 0	0.132 0	0.024 0	0.035 0	0.244 0	0.053 0	0.170 0
ML1-23	5 356.49	粉—细晶白云岩	缝洞白云石	0.385 0	0.590 0	0.104 0	0.559 0	0.582 0	0.300 0	0.062 0	0.166 0	0.028 0	0.151 0
ML1-24	5 356.88	中—粗晶白云岩	缝洞方解石	2.000 4	3.577 8	0.600 4	2.615 6	0.622 1	0.090 9	0.083 1	0.554 1	0.134 3	0.394 5
ML1-25	5 356.88	硅质中—粗晶白云岩	全岩	12.497 6	17.485 4	1.750 6	6.187 7	0.833 3	0.103 1	0.094 1	0.673 2	0.178 0	0.525 9
ML1-26	5 429.08	细—中晶白云岩	全岩	1.093 0	1.451 0	0.156 0	0.729 0	0.131 0	0.038 0	0.018 0	0.088 0	0.016 0	0.046 0
ML1-27	5 523.29	细—中晶白云岩	全岩	0.990 2	1.650 9	0.210 2	0.919 5	0.190 1	0.039 0	0.040 1	0.170 6	0.040 1	0.110 3
ML1-28	5 523.52	细晶白云岩	全岩	0.656 9	2.184 9	0.370 5	1.858 0	0.533 4	0.043 7	0.079 0	0.547 8	0.106 9	0.292 1
ML1-29	5 523.72	细—中晶白云岩	全岩	4.324 4	8.666 1	0.886 0	3.280 6	0.521 4	0.157 3	0.042 8	0.274 1	0.060 8	0.171 1
ML1-30	5 523.96	泥微晶白云岩	缝洞白云石	14.178 0	27.549 0	3.863 0	15.644 0	2.551 0	0.564 0	0.340 0	1.292 0	0.202 0	0.583 0

续表 1

编号	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	ΣLREE/ΣHREE	δCe	δEu	δPr	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Tb/Yb) _N
ML1-01	0.154 0	0.840 0	0.126 0	211.353 0	206.884 0	4.469 0	46.293 1	1.21	1.85	0.97	5.79	2.60	1.64
ML1-02	0.030 0	0.280 0	0.039 0	16.778 0	14.869 0	1.909 0	7.788 9	0.76	2.85	1.19	1.01	0.21	4.02
ML1-03	0.178 9	1.027 8	0.146 7	80.933 6	74.886 5	6.047 1	12.383 9	0.84	0.95	1.16	1.55	0.87	1.38
ML1-04	0.104 1	0.596 9	0.096 7	33.206 4	30.269 1	2.937 3	10.305 1	0.83	0.93	1.20	1.17	0.96	0.98
ML1-05	0.074 0	0.439 0	0.068 0	44.472 0	42.200 0	2.272 0	18.573 9	0.84	1.09	1.15	2.50	1.70	1.51
ML1-06	0.063 0	0.358 0	0.057 0	33.473 0	31.613 0	1.860 0	16.996 2	0.84	1.63	1.16	2.20	1.14	1.50
ML1-07	0.058 8	0.344 7	0.031 3	41.557 5	39.571 9	1.985 6	19.929 4	0.96	1.29	1.05	2.82	1.61	1.31
ML1-08	0.046 0	0.263 0	0.039 0	32.136 0	30.745 0	1.391 0	22.102 8	0.94	1.32	1.13	3.07	1.72	1.35
ML1-09	0.063 9	0.380 4	0.053 0	43.383 0	41.518 2	1.864 8	22.264 2	0.89	1.23	1.09	3.01	1.94	1.08
ML1-10	0.106 8	0.764 1	0.132 8	29.784 6	27.352 1	2.432 5	11.244 4	0.78	0.76	1.07	1.13	2.47	0.34
ML1-11	0.049 0	0.519 0	0.069 0	8.789 0	6.400 0	2.389 0	2.678 9	0.69	2.53	1.23	0.14	0.07	2.28
ML1-12	0.027 2	0.135 8	0.015 8	17.380 4	16.439 9	0.940 5	17.480 0	0.84	0.79	1.18	2.45	0.89	1.69
ML1-13	0.027 6	0.154 5	0.017 8	14.169 0	13.329 0	0.840 0	15.867 9	0.86	1.23	1.09	2.13	1.26	1.09
ML1-14	0.075 0	0.388 0	0.057 0	41.476 0	39.175 0	2.301 0	17.025 2	0.86	0.97	1.22	2.57	1.34	1.73
ML1-15	0.066 0	0.382 0	0.057 0	30.644 0	28.635 0	2.009 0	14.253 4	0.84	1.56	1.13	1.80	1.13	1.48
ML1-16	0.042 0	0.227 0	0.033 0	10.162 0	8.965 0	1.197 0	7.489 6	0.82	1.00	1.10	0.79	0.64	1.35
ML1-17	0.044 0	0.312 0	0.051 9	18.554 3	17.513 6	1.040 7	16.828 7	0.74	0.96	1.05	2.10	5.24	0.33
ML1-18	0.024 5	0.128 4	0.012 5	7.352 3	6.551 9	0.800 4	8.185 8	0.75	0.90	1.14	1.02	0.58	1.40
ML1-19	0.018 4	0.099 5	0.011 1	6.175 1	5.510 7	0.664 4	8.294 3	0.89	0.98	1.10	1.00	0.56	1.41
ML1-20	0.053 1	0.277 6	0.038 7	17.634 9	15.882 3	1.752 6	9.062 1	0.88	0.97	1.08	1.25	0.81	1.28
ML1-21	0.035 0	0.176 0	0.026 0	8.832 0	7.879 0	0.953 0	8.267 6	0.76	0.86	1.06	1.12	0.99	1.43
ML1-22	0.028 0	0.165 0	0.024 0	2.509 0	1.790 0	0.719 0	2.489 6	0.89	0.60	1.13	0.15	0.35	0.77
ML1-23	0.015 0	0.104 0	0.018 0	3.064 0	2.520 0	0.544 0	4.632 4	0.64	2.76	1.05	0.36	0.12	2.17
ML1-24	0.054 7	0.269 2	0.039 7	11.036 8	9.507 2	1.529 6	6.215 5	0.71	0.71	1.18	0.72	0.57	1.13
ML1-25	0.080 6	0.412 0	0.063 2	40.884 7	38.857 7	2.027 0	19.170 1	0.78	0.65	1.04	2.94	2.67	0.83
ML1-26	0.006 0	0.037 0	0.006 0	3.815 0	3.598 0	0.217 0	16.580 6	0.74	1.39	0.94	2.86	1.49	1.77
ML1-27	0.010 0	0.080 5	0.010 0	4.461 5	3.999 9	0.461 6	8.665 3	0.79	0.78	1.05	1.19	0.93	1.82
ML1-28	0.037 8	0.181 2	0.021 6	6.913 8	5.647 4	1.266 4	4.459 4	0.89	0.38	1.09	0.35	0.22	1.59
ML1-29	0.020 7	0.108 8	0.011 9	18.526 0	17.835 8	0.690 2	25.841 5	0.96	1.79	1.03	3.85	1.48	1.43
ML1-30	0.063 0	0.344 0	0.047 0	67.220 0	64.349 0	2.871 0	22.413 4	0.81	1.07	1.15	3.99	0.99	3.60

注:稀土元素质量分数单位为 10⁻⁶。下标 N 代表稀土元素的 NASC 标准化值,ΣREE、ΣLREE、ΣHREE 分别代表总稀土、轻稀土、重稀土元素。δCe=2C_{EN}/(L_{AN}+Pr_N), δEu=2E_{UN}/(Sm_N+Tb_N), δPr=2Pr_N/(C_{EN}+Nd_N)。

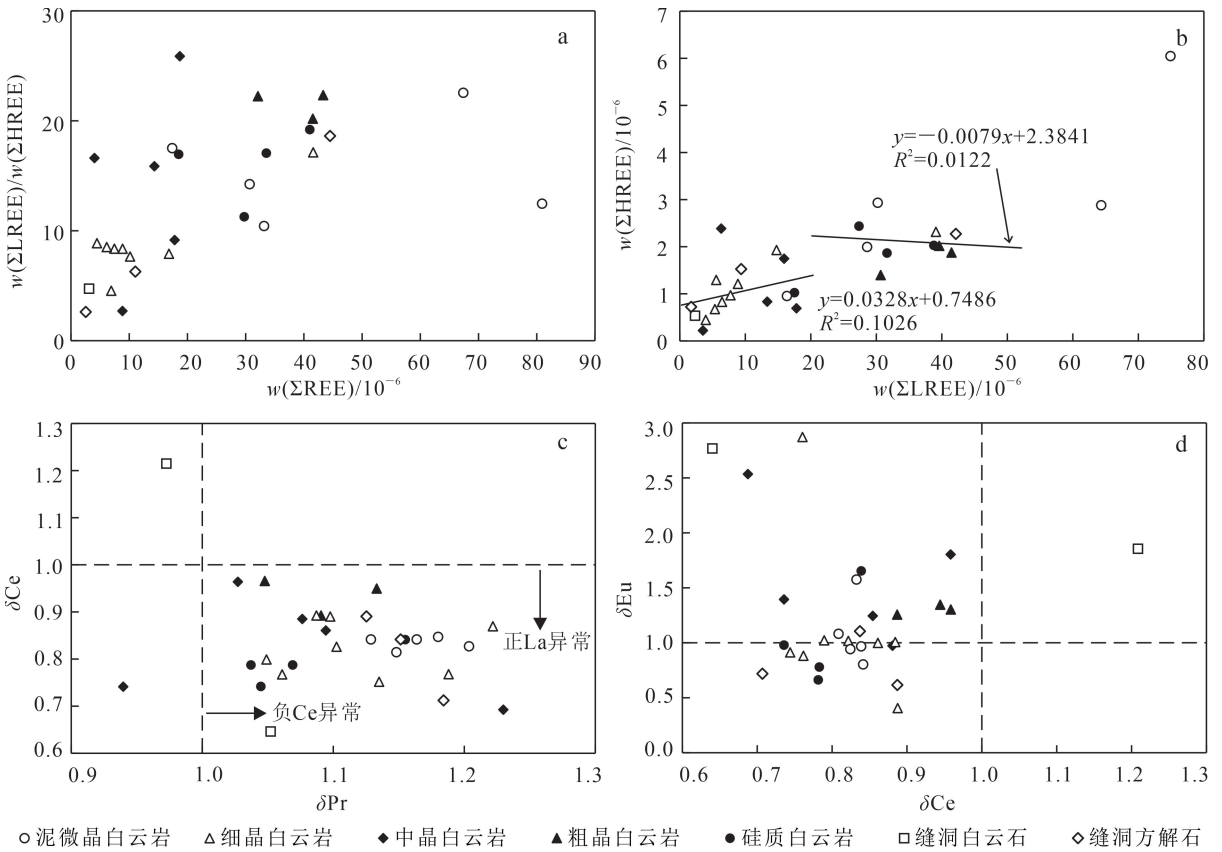


图 3 米兰 1 井寒武系白云岩稀土元素地化特征图

Fig.3 REE geochemical characteristics of Cambrian dolomite in Well Milan 1

1), 配分曲线为左倾型, 表现出轻稀土亏损、重稀土富集特征。该类样品主要是细晶白云岩和中晶白云岩。

4) δEu 正异常型(图 4d)。该类样品 δCe 弱负异常, 介于 0.74~1.21 之间, 平均值为 0.92; δEu 正异常, 介于 1.23~1.85 之间, 平均值为 1.48; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 1.80~5.79 之间, 平均值为 3.06(表 1), 配分曲线为右倾型, 表现出轻稀土富集、重稀土亏损特征。该类样品主要是细晶白云岩、中晶白云岩和粗晶白云岩。

5) “V”字型(图 4e)。该类样品 δCe 弱负异常, 介于 0.74~0.78 之间, 平均值为 0.77; δEu 负异常, 介于 0.65~0.96 之间, 平均值为 0.79; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 2.47~5.24 之间, 平均值为 3.46, $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 0.33~0.83 之间, 平均值为 0.50(表 1), 配分曲线总体呈现出“V”字型, 表现出轻稀土、重稀土分别富集的特征。该类样品主要是部分硅质白云岩。

综上所述, 不同类型样品其 REE 配分模式也有明显差别。 δCe 负异常型配分模式主要为泥微晶白云岩和细晶白云岩, δEu 负异常型配分模式主要为泥微晶白云岩和细晶白云岩, δEu 强正异常型配分

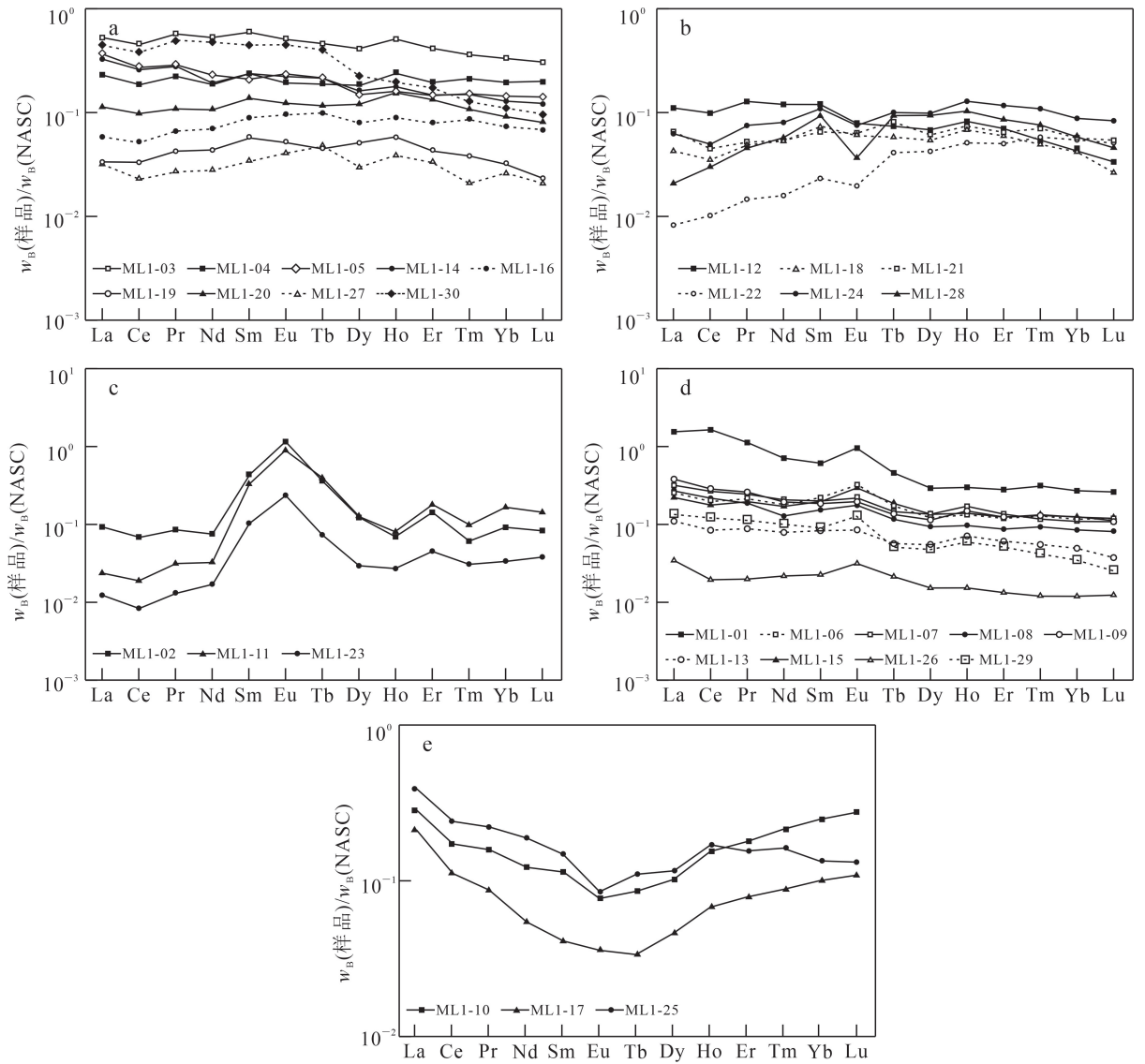
模式主要为细晶白云岩和中晶白云岩, δEu 正异常型配分模式主要为细晶白云岩、中晶白云岩和粗晶白云岩, “V”字型配分模式主要为硅质白云岩。

5 稀土元素对白云岩成因的指示

稀土元素 Ce 对环境的氧化还原性非常敏感, 在蒸发的氧化条件下, 容易形成 δCe 负异常^[4-7, 32-33]。Eu 对环境的温度非常敏感, 在高温的热液环境中, Eu 化学价位容易发生变化, 进而形成 δEu 正异常^[32-33]; 而在低温的埋藏环境中, δEu 往往呈现负异常特征。依据不同的特征参数、配分模式等, 可将研究区白云岩成因分为 3 类。

5.1 蒸发泵模式

中晚寒武世塔里木盆地位于赤道低纬度地区^[35-36], 米兰地区以台地、台地边缘沉积环境为主。较浅的水体、经常性的波动和炎热的气候很容易使海水发生强烈蒸发^[6], 浓缩海水作用于刚沉积的堆积物上, 形成蒸发泵机制的白云岩, 使其呈 δCe 负异常特征^[13-21]。米兰 1 井大部分样品具有 δLa 正



a. δCe 负异常型; b. δEu 负异常; c. δEu 强正异常; d. δEu 正异常型; e. “V”字型。

图 4 米兰 1 井寒武系白云岩稀土元素 NASC 标准化配分模式图

Fig.4 NASC normalized REE distribution patterns of Cambrian dolomites in Well Milan 1

异常、 δCe 负异常特征(图 3c, 图 4a—e), δCe 平均值为 0.83, 这与海水 REE 标准化后的特征相似^[34-35], 表明其白云化流体为蒸发海水, 也说明米兰 1 井白云岩大多具有蒸发泵模式的成因特征。

从沉积环境来看, 所有突尔沙克塔格组白云岩(不论形成于滩间海亚相的颗粒滩微相, 还是形成于台缘滩亚相的颗粒滩微相), 大多具有 δCe 负异常特征, 说明蒸发泵模式是其白云化的基础原因, 同时部分后期往往经受了埋藏白云化或(和)热液白云化。

一般情况下, 该模式的白云岩形成时温度低、盐度高、结晶速度快^[4-7, 13-21], 所以晶粒细小, 多形成泥

微晶、细晶白云岩。然而这些白云岩后期可能经受其他流体(埋藏流体或热液流体)的再作用, 使白云岩继续生长, 晶粒变大。

5.2 埋藏白云化模式

米兰 1 井寒武系部分较粗粒白云岩 δEu 负异常明显(图 4b), 与低温碱性环境中形成的白云岩具有相似的粒度和 δEu 特征^[4-7, 13-21]。同时, 大多样品具有较脏的晶面、雾心亮边结构、他形晶体、阴极发光呈暗红—红色等特点, 也说明其可能形成于埋藏环境^[4]。此外, 配分曲线近水平、 δEu 负异常的特征也与赵文智等^[37]、郭春涛等^[4-7]、郑剑锋等^[38]在塔中、塔北、塔东识别的埋藏白云岩特征一致。白云

化流体可能的来源较多,如上覆厚层泥岩中封存的流体通过断层使寒武系白云化^[4-7, 13-21],或者紧邻的满加尔凹陷内细碎屑岩封存的海源性流体侧向运移使寒武系白云化。

从沉积环境来看,埋藏白云化主要发育于台缘滩亚相的颗粒滩微相,这可能与颗粒滩微相相对较大的原始孔隙度、上覆厚层泥岩(黑土凹组、却而却克组等)中封存的流体通过断层使寒武系白云化^[4-7, 13-21]等有关。

5.3 热液白云化模式

碳酸盐岩的热液改造通常表现出独特的岩石学和沉积学特征,如晶形完好且粗大,曲面-他形晶,裂洞中存在鞍形白云石,波状消光,典型的热液矿物如硅质岩、重晶石、石英、玉髓等^[4-7]。图 4c、d、e 中样品大多为较粗粒白云岩或硅质白云岩,其晶粒粗大、波状消光、硅质组分等特征表明其可能是热液成因。

热液成因的白云岩一般具有 δEu 正异常特征^[32-33]。当高温热液参与碳酸盐岩白云化的时候,可能会造成 Eu^{3+} 被氧化为难溶的 Eu^{4+} ,从而使白云岩呈现 δEu 正异常^[32-33]。图 4c、d 样品均表现出明显的 δEu 正异常,与塔北、塔东、四川等地区热液白云岩具有相似的特征^[4-7, 13-23],还符合赵文智等^[37]、郑剑锋等^[38]的热液白云岩识别标志,表明这些样品可能形成于热液环境。

对比图 4c 和图 4d 及表 1 可知,两者在曲线形态、REE 质量分数、 δEu 特征、 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 等方面存在较明显的不同;图 4c 样品粒度较细,稀土元素 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 0.14~1.01 之间,平均值为 0.50,配分曲线整体左倾,REE 质量分数平均值为 $9.544\ 3 \times 10^{-6}$,同时 δEu 正异常特征明显;而图 4d 样品粒度较粗,稀土元素 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 1.80~5.79 之间,平均值为 3.06,配分曲线整体右倾,REE 质量分数平均值为 $27.213\ 2 \times 10^{-6}$,与塔北、塔东、川北等地区热液白云岩 REE 富集特征相似^[4-7, 13-23]。这些差异表明这两组白云岩可能形成于不同的环境,可能有两期不同的热液流体作用于白云岩上,这与塔东地区古城低凸起寒武系白云岩的多期热液作用相似^[4, 18]。

虽然硅质白云岩样品均显示出 δEu 负异常特征(图 4e),但并不能说明其形成于埋藏环境。实际上,中粗晶、硅质团块、波状消光等岩石学特征表明其可能形成于热液环境^[4-7],如样品 ML1-17(图 2h、4e)。实际上, δEu 负异常型白云岩可能在塔里

木盆地广泛存在,如古城地区寒武系热液白云岩^[18]、塔北地区下奥陶统热液白云岩^[16, 39]。而寒武纪以来,塔里木盆地发生过多次大面积的构造热事件^[40],这可能解释了多期和多类热液的来源。

米兰 1 井 23 件全岩样品中共 13 件(52.0%的全岩样品)受到了热液白云化的影响,形成于最少 3 种不同类型的热液环境。热液白云化的形成主要与不同时期的热液侵入有关,其分布取决于热液与断裂体系、孔渗体系等的时空配置关系。从沉积环境来看,突尔沙克塔格组热液白云岩自下而上均有分布,但主要发育于基质孔隙度相对较大的中上部的台缘滩亚相的颗粒滩微相中。

综上所述,米兰 1 井寒武系白云岩的成因比较复杂,浓缩蒸发海水交代文石颗粒,形成蒸发泵模式白云岩,几乎所有样品的 δCe 均小于 1.0,表明该模式白云岩的广泛性。随着沉积物埋藏深度逐渐增加,埋藏流体还原性增强,形成粒度相对较粗的埋藏白云岩。同时,多种类型的热液沿着基底断裂所产生的裂缝系统进入碳酸盐岩,对裂缝周围的原岩发生溶蚀和改造,形成热液白云岩。总的来说,蒸发作用是米兰 1 井白云岩形成的基础,而埋藏作用和多期热液作用的叠加是白云岩形成的关键。

6 结论

1)根据稀土元素质量分数、特征参数、配分曲线等,塔东地区米兰 1 井寒武系白云岩可分为五种类型: δCe 负异常型、 δEu 负异常型、 δEu 强正异常型、 δEu 正异常型、“V”字型。

2)塔东地区米兰 1 井中上寒武统白云岩可能有多种形成机制。蒸发作用形成的白云岩广泛分布,但后期大多受到埋藏流体或(和)热液流体的改造。晶粒细小的白云岩主要是蒸发泵作用形成的,晶粒较大的白云岩可能形成于埋藏环境或热液环境,硅质白云岩大多受到了热液的再作用。

3)从稀土元素特征来看,可能有 3 种不同类型的热液有助于米兰 1 井白云岩的形成。

参考文献(References):

- 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] 杨海军. 塔里木盆地古生界内幕白云岩勘探认识与勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1214-1234.
- Yang Haijun. Exploration Knowledge and Direction of Lower Proterozoic Inner Dolostones, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1214-1234.
- [3] 乔占峰, 张峭楠, 沈安江, 等. 塔里木和四川盆地白云岩规模优质储层形成与发育控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 92-104.
- Qiao Zhanfeng, Zhang Shaonan, Shen Anjiang, et al. Controls on Formation and Development of Large-Sized High-Quality Dolomite Reservoirs in the Tarim and Sichuan Basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 92-104.
- [4] 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. Rare Earth Element Geochemistry Characteristics and Genetic Model of Upper Cambrian Dolomite in Gucheng Area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(5): 666-674.
- [5] 郭春涛, 李如一, 陈树民. 塔里木盆地古城地区鹰山组白云岩稀土元素地球化学特征及成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(4): 1121-1134.
- Guo Chuntao, Li Ruyi, Chen Shumin. Rare Earth Element Geochemistry and Genetic Model of Dolomite of Yingshan Formation in Gucheng Area, Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(4): 1121-1134.
- [6] 郭春涛, 宋海强, 梁洁, 等. 塔东地区米兰1井寒武系白云岩成因及其对储层的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 953-964.
- Guo Chuntao, Song Haiqiang, Liang Jie, et al. Origin of Cambrian Dolomite from Well Milan 1 in Tadong Area and Its Significance to Dolomite Reservoir[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 953-964.
- [7] 郭春涛, 陈继福. 塔里木盆地古城地区蓬莱坝组白云岩稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(4): 66-74.
- Guo Chuntao, Chen Jifu. Rare Earth Element Geochemistry of the Dolomite in the Penglaiba Formation of the Gucheng Area, Tarim Basin, and Its Implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(4): 66-74.
- [8] 刘英辉. 准噶尔盆地乌—夏地区风城组云质岩类沉积环境及成因探讨[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 80-93.
- Liu Yinghui. Origin of Dolomitic Tuff in Permian Fengcheng Formation in Wu - Xia Area of Junggar Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 80-93.
- [9] 史江涛, 郝君明, 王小雷. 塔河地区奥陶系鹰山组储层特征及其主控因素[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(3): 348-362.
- Shi Jiangtao, Hao Junming, Wang Xiaolei. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation in Tahe Area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(3): 348-362.
- [10] 柳青兵, 蔡忠贤, 薛玉芳, 等. 塔里木盆地柯坪周缘地区肖尔布拉克组白云岩孔隙结构全孔径表征[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(13): 5213-5221.
- Liu Qingbing, Cai Zhongxian, Xue Yufang, et al. Full Pore Size Characterization of Dolomite Pore Structure of Xiaolbulake Formation in the Peripheral Area of Keping, Tarim Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(13): 5213-5221.
- [11] 章学刚, 熊冉, 邓庆杰, 等. 四川盆地洗象池组颗粒滩沉积组合特征及沉积控储机理[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(4): 1389-1398.
- Zhang Xuegang, Xiong Ran, Deng Qingjie, et al. Sedimentary Characteristics and Controls of Reservoirs of the Shoals of Xixiangchi Formation in Sichuan Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(4): 1389-1398.
- [12] 刘禹, 郑剑锋, 曾溅辉, 等. 塔里木盆地柯坪露头区震旦系微生物白云岩储层微观表征[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(1): 49-62.
- Liu Yu, Zheng Jianfeng, Zeng Jianhui, et al. Micro-Characterization of Microbial Dolomite Reservoir of Upper Sinian Qigeblak Formation in Keping Area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(1): 49-62.
- [13] 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]. 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: Chengdu University of Technology, 2014.

- [14] 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-Lower 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.
- [15] 吴仕强, 朱井泉, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩稀土元素特征及其成因意义[J]. 现代地质, 2009, 23(4): 638-647.
Wu Shiqiang, Zhu Jingquan, Hu Wenxuan, et al. Rare Earth Element Geochemistry Characteristics of Cambrian-Ordovician Dolostones in the Tarim Basin and Their Implications for the Origin[J]. Geoscience, 2009, 23(4): 638-647.
- [16] 韩银学, 李忠, 韩登林, 等. 塔里木盆地塔北东部下奥陶统基质白云岩的稀土元素特征及其成因[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2405-2416.
Han Yinxue, Li Zhong, Han Denglin, et al. REE Characteristics of Matrix Dolomites and Its Origin of Lower Ordovician in Eastern Tabei Area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2405-2416.
- [17] 符浩, 李国蓉, 陈兰朴, 等. 塔东地区寒武系白云岩地球化学特征与成因模式[J]. 东北石油大学学报, 2016, 40(2): 47-58.
Fu Hao, Li Guorong, Chen Lanpu, et al. Geochemical Characteristics and Genetic Model of Cambrian Dolomite in East Tarim Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2016, 40(2): 47-58.
- [18] 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.
- [19] 金振奎, 杨有星, 余宽宏, 等. 塔里木盆地东部地区寒武系白云岩成因类型[J]. 古地理学报, 2012, 14(6): 747-756.
Jin Zhenkui, Yang Youxing, Yu Kuanhong, et al. Genetic Types of Dolostones in the Cambrian, Eastern Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 747-756.
- [20] 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 and Gas Geology, 2014, 35(6): 860-869.
- [21] 陈永权, 周新源, 杨海军. 塔里木盆地塔中地区上寒武统三种截面特征白云岩的岩石地球化学特征与成因研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 209-218.
Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Yang Haijun. Geochemical Research and Genesis of Dolostones with Different Crystal Characteristics Occurring in the Upper Cambrian, Central Area of Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 209-218.
- [22] 胡忠贵, 郑荣才, 胡九珍, 等. 川东—渝北地区黄龙组白云岩储层稀土元素地球化学特征[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 782-790.
Hu Zhonggui, Zheng Rongcai, Hu Jiuzhen, et al. Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements of Huanglong Formation Dolomites Reservoirs in Eastern Sichuan-Northern Chongqing Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 782-790.
- [23] 蒋裕强, 谷一凡, 刘均, 等. 川东北龙岗东地区二叠系—三叠系热液活动证据及意义[J]. 沉积学报, 2018, 36(1): 1-11.
Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Liu Jun, et al. The Evidence of Hydrothermal Activity and Its Significance of Permian-Triassic Strata, Eastern Longgang Area, Northeastern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(1): 1-11.
- [24] 冯增昭, 鲍志东, 吴茂炳, 等. 塔里木地区奥陶纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 2007, 9(5): 447-460.
Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Wu Maobing, et al. Lithofacies Paleogeography of the Ordovician in Tarim Area[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(5): 447-460.
- [25] 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.
- [26] 邵龙义, 韩俊, 马锋, 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):

- 953-962.
- 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): 953-962.
- [27] 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.
- [28] 林畅松, 李思田, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 210-218.
- Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic Framework and Paleogeographic Evolution of the Tarim Basin During the Paleozoic Major Evolutionary Stages [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 210-218.
- [29] Palmer M R. Rare Earth Elements in Foraminifera Tests[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1985, 73: 285-298.
- [30] 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 Petrology*, 1988, 58: 415-432.
- [31] Kawabe I. Convex Tetrad Effect Variations in REE Abundances of "North American Shale Composite" and "Post-Archean Australian Average Shale"[J]. *Geochemical Journal*, 1996, 30(3): 149-153.
- [32] Frimmel H E. Trace Element Distribution in Neoproterozoic Carbonates as Palaeoenvironmental Indicator[J]. *Chemical Geology*, 2009, 258: 338-353.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 王洪浩, 李江海, 杨静懿, 等. 塔里木陆块新元古代—早古生代古板块再造及漂移轨迹[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 637-647.
- Wang Honghao, Li Jianghai, Yang Jingyi, et al. Paleo-Plate Reconstruction and Drift Path of Tarim Block from Neoproterozoic to Early Palaeozoic[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(6): 637-647.
- [36] Zhang J, Nozaki Y. Rare Earth Elements and Yttrium in Seawater; ICP-MS Determinations in the East Caroline, Coral Sea, and South Fiji Basins of the Western South Pacific Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(23): 4631-4644.
- [37] 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 Dolomite Reservoirs in Tarim Basin, Northwestern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 758-768.
- [38] 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.
- [39] 朱东亚, 金之均, 胡文瑄. 塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2010, 40(2): 156-170.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal Recrystallization of the Lower Ordovician Dolomite and Its Significance to Reservoir in Northern Tarim Basin[J]. *Science China: Earth Science*, 2010, 40(2): 156-170.
- [40] 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 塔里木盆地地质热事件研究[J]. *科学通报*, 1997, 42(10): 1096-1098.
- Chen Hanlin, Yang Shufeng, Dong Chuanwan, et al. Study on Geological Thermal Events in Tarim Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(10): 1096-1098.