

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018122502

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

郭春涛^{1,2,3}, 陈继福³

1. 六盘水师范学院矿业与土木工程学院, 六盘水 553004

2. 中国石油天然气集团公司大庆油田博士后科研工作站, 大庆 163453

3. 山西大同大学建筑与测绘工程学院, 大同 037003

摘要:塔里木盆地塔东低隆起中下奥陶统白云岩成因众说纷纭,严重阻碍了该区油气勘探步伐。基于岩芯、薄片、阴极发光等观察,针对塔东低隆起古城构造带中下奥陶统蓬莱坝组,对各种粒度白云岩、缝洞方解石、泥晶灰岩进行了系统的稀土元素地球化学特征的测试。各种粒度白云岩、缝洞方解石测试结果用泥晶灰岩稀土元素含量进行标准化。结果表明,样品稀土元素配分曲线可分为三种类型。综合白云岩岩石学特征和地球化学特征发现,较细粒白云岩及缝洞充填物呈现明显的负 δCe 特征,表明其形成于蒸发环境;较粗粒白云岩和缝洞充填物则分为负 δEu 型、正 δEu 型两种,其中负 δEu 型样品形成于埋藏环境,而正 δEu 型样品形成于热液环境。而早期形成的白云岩在埋藏过程中可能受到埋藏流体、热液流体的再作用。

关键词:白云岩;稀土元素地球化学特征;塔里木盆地;蓬莱坝组

中图分类号:TE122 **文献标识码:**A

Rare earth element geochemistry of the dolomite in the Penglaiba Formation of the Gucheng area, Tarim basin and its implications

GUO Chuntao^{1,2,3}, CHEN Jifu³

1. School of Mining and Civil Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China

2. Postdoctoral Research Station of Daqing Oilfield, CNPC, Daqing 163453, China

3. College of Architecture and Surveying Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China

Abstract: Disputes have occurred for a long time on the forming mechanism of the dolomite in the Lower Ordovician Penglaiba Formation in the Gucheng area of Tadong low uplift, Tarim Basin, that have seriously hindered oil and gas exploration there. This time, based on the observation of cores, thin sections and cathodoluminescence results, the geochemical characteristics of rare earth elements from various forms of dolomite, such as sparite, cave filling and micrite, are systematically analyzed. All the testing results are standardized by the rare earth elements in micrite. There observed three types of REE distribution patterns which suggest three kinds. The first kind of dolomitization is the buried dolomitization by fluids; the second kind of dolomitization formed in a hydrothermal environment, and the third kind driven by evaporative pump. Some dolomite formed earlier may be further modified and/or reformed by other kinds of dolomitization fluids later on.

Key words: dolomite; REE geochemistry; Tarim Basin; Penglaiba formation

稀土元素(REE)常常作为白云岩地球化学过程的示踪剂,通过白云岩REE组成和配分模式的分析,可以揭示白云岩形成环境和白云岩化流体特征。我国塔里木盆地^[1-6]、四川盆地^[7-11]、鄂尔多斯盆地^[12,13]等均发育巨厚的古生界白云岩,利用稀土元素和(或)其他元素分析白云岩化流体的来源和期次,进而判断白云岩成因和预测其展布,已经成为一

种切实可靠并广泛使用的方法。

塔里木盆地震旦系—奥陶系发育了面积广、层数多、累计厚度大的白云岩地层,在一些地区已经有油气显示或发现了大的油气藏,如顺北、塔北、塔中等^[2-6,14,15]。近年来,塔东低凸起古城构造带陆续也在白云岩地层中有显著突破,如古城6、古城8、古城9井等^[6,15],白云岩地层逐渐显现出良好的勘探潜

资助项目:国家自然科学基金青年项目“库车坳陷冲断构造带下侏罗统阿合组砂岩沉积—成岩结构与储层形成机制”(41802171)

作者简介:郭春涛(1981—),男,博士,从事沉积学研究,E-mail: xinylx521@163.com

收稿日期:2018-12-25; **改回日期:**2019-02-06. 周立君编辑

力。

目前,古城地区的油气显示均集中于白云岩地层中,然而白云岩储集层的发育和展布不清一直制约着勘探的步伐,因此有必要探讨白云岩的成因机制,进而指导勘探。然而,古城地区白云岩的研究主要集中于鹰山组和寒武系中^[2-6,15],对蓬莱坝组关注非常少,由于蓬莱坝组白云岩与鹰山组白云岩具有相似的沉积、成岩、构造、成藏条件,因此蓬莱坝组白云岩具有研究的必要性。基于此,笔者选取塔东低隆起古城构造带下奥陶统白云岩为研究对象,在详细的岩心、薄片、阴极发光等观察基础上,对该地区蓬莱坝组有代表性的白云岩进行了全岩和微区稀土元素地化特征分析,以期能揭示古城构造带蓬莱坝组白云岩化流体的来源,丰富对塔东地区白云岩成因和形成环境的认识,为白云岩储层的勘探提供成因依据。

1 地质背景

塔里木盆地位于中国西北部,是经历漫长的、多期的构造变革和多个原型盆地叠合、改造的大型叠合盆地^[16]。塔东低隆起位于塔里木盆地东南部(图 1a),可划分为古城构造带、英吉苏构造带、米兰构造

带、罗布泊构造带等多个三级构造单元(图 1b),而古城构造带位于塔东低隆起、塔中低隆起的交接部位,夹持于满加尔凹陷、东南坳陷之间(图 1c),是一个继承性的古隆起,其古生代沉积构造演化与塔中碳酸盐岩台地关系密切。

区域构造研究表明,塔里木盆地在震旦纪—志留纪经历了裂谷、被动大陆边缘、克拉通内坳陷等演化阶段^[16,17]。根据寒武纪和奥陶纪岩相古地理特征^[18,19],晚寒武纪—早中奥陶世塔里木盆地东部为深水盆地,中西部为碳酸盐岩台地,沉积了巨厚的下丘里塔格群、蓬莱坝组、鹰山组碳酸盐岩。而古城地区即位于台地向盆地过渡区,在 seismic 剖面上古城 4 井附近可以看到陡峭的斜坡发育^[14]。晚奥陶世—志留纪受周缘大洋俯冲闭合的影响,塔里木盆地构造背景发生急剧转变^[16,17],海平面迅速上升,形成一间房组和土木休克组淹没台地沉积。随着周缘造山活动加剧,海平面迅速下降,以细碎屑岩为主的却尔却克组代表了超补偿的斜坡—盆地环境。志留纪之后,研究区发生大规模的抬升剥蚀,直至早石炭世才开始继续接受沉积。

寒武纪至奥陶纪,古城地区经历了早寒武世缓坡台地、晚寒武纪—早奥陶世镶边台地、晚奥陶世淹没台地的演化阶段。早奥陶世蓬莱坝组以半局限台

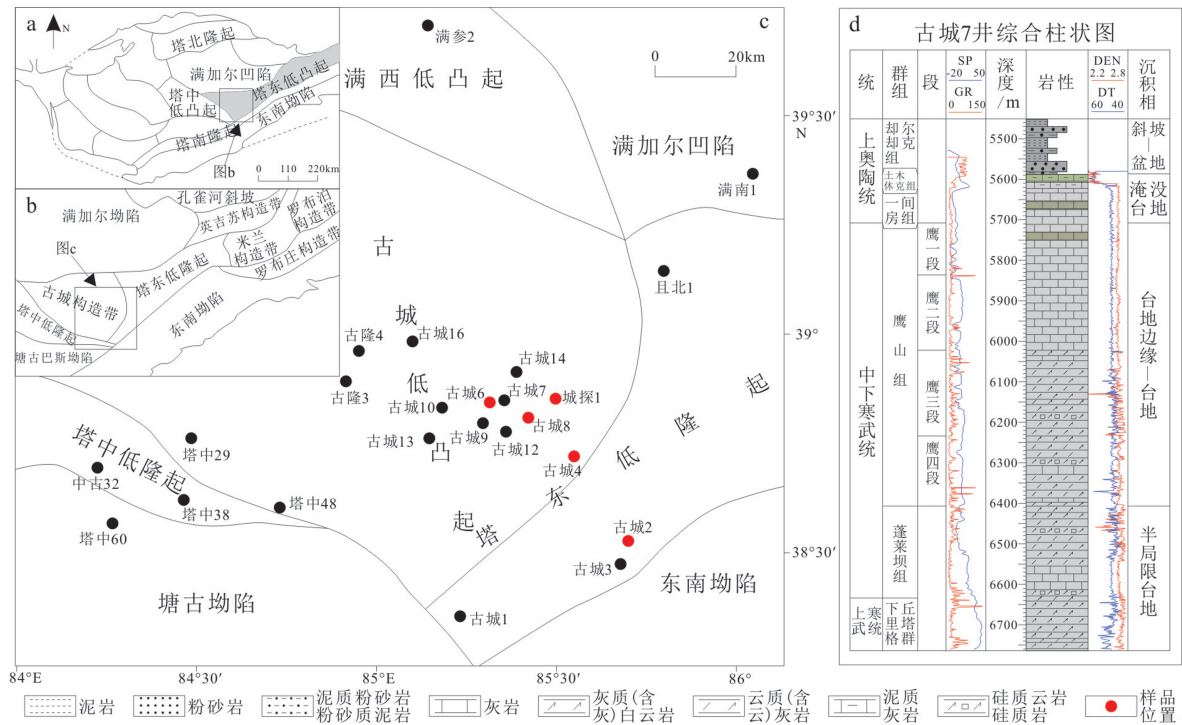


图 1 古城地区位置简图及典型井柱状图

Fig.1 A well stratigraphic column and geological sketch maps in Gucheng area

地环境为主。岩性方面(图 1d),蓬莱坝组以泥晶灰岩、砂屑灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩、藻白云岩为主,部分含有硅质白云岩、硅质岩。地层稳定且厚度较大,钻井显示单井钻遇厚度为 186~223m。东部(古城 4 井及以东)基本不发育白云岩,向西白云岩厚度逐渐增加。

2 样品与实验

本文针对古城地区下奥陶统蓬莱坝组有代表性的白云岩进行了详细的取样,具体包括古城 4、古城 6、古城 8 等多口井(图 1c),样品岩性主要是各种粒度的白云岩,包括粉晶白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩、粗—中晶白云岩。在岩心、薄片分析基础上,挑选不含泥质、铁质、硅质、不含裂缝的纯净白云岩作为测试样品。同时,为了对比测试结果,本文还对缝洞充填物进行了取样。另外,为了便于对比,在显微镜下精选部分后期改造弱的泥晶灰岩样品做测试,委托成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室进行测试。实验仪器为 PE 公司的 Elan DRC-e 仪器,温度为 20℃,相对湿度为 30%,根据 DZ/T0223-2001(电感耦合等离子体质谱(ICP-MS))方法测定。测试过程先将样品在玛瑙研钵中

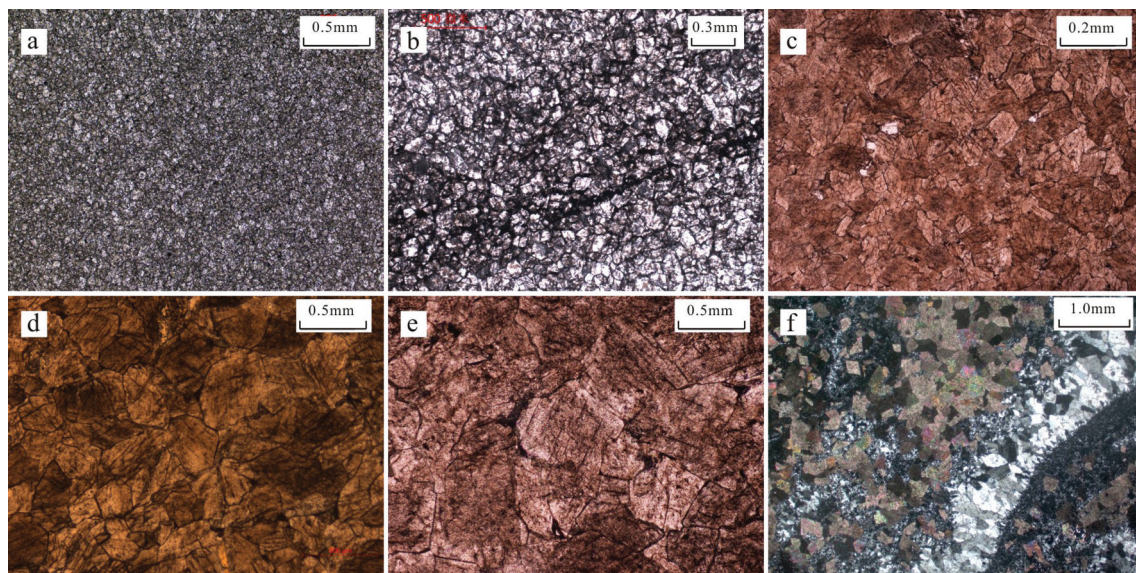
研磨至 200 目,干燥后取样品 100mg,依次加适量浓 HF、浓 HNO₃ 后烘干,以除去硅、HF 等,反复两次,然后加入 HNO₃ 浓酸,后烘干浸出样品。将样品转移至容量瓶,加入内标溶液,稀释至 100mL,后上机测试。

3 岩石学特征

通过岩心、薄片、阴极发光等,对 8 口井 179 个样品进行仔细鉴定,49.1%为灰岩,36.3%为结晶白云岩,14.5%为硅质岩、硅质白云岩、硅质灰岩,其中结晶白云岩往往含有一定量的灰质成分。按照晶体粒度大小,结晶白云岩可分为以下 4 种类型。还可依据晶面、含有物、晶形等进一步划分出次一级类型(图 2)。

3.1 泥粉晶白云岩

泥粉晶白云岩在研究区分布较多,占比 25%。晶体颗粒一般很小(图 2a),晶体自形程度通常很差,以他形晶为主,晶体表面普遍较脏。晶间可见沥青或泥质充填,岩性致密,晶间往往为线接触、缝合接触、镶嵌接触。局部有缝合线、构造缝。



a.古城 7,6499.0m,粉晶白云岩,晶粒极细小,较均匀;b.古城 12,6680.8m,细—粉晶半自形白云岩,线接触;c.古城 8,6401.3m,细晶白云岩;d.古城 8,6403.6m,中晶半自形白云岩,凹凸接触,见雾心亮边结构;e.古城 8,6407.5m,粗—中晶他形白云岩,具波状消光,见雾心亮边结构;f.古城 9,6557.72m,硅质中晶白云岩,点接触或线接触,表面干净,硅质充填,可见自生石英

图 2 古城地区白云岩正交偏光镜下特征

Fig.2 Features of dolomite from Penglaiba Formation of Gucheng area under orthogonal polarizing microscope

3.2 细晶白云岩

此类白云岩是研究区的主要岩石类型,包括细—粉晶白云岩、细晶白云岩(图 2b、c),占有白云岩薄片的 36% 左右。晶形自形程度较差,以他形、半自形为主,部分可见颗粒幻影。晶间呈凹凸接触、线接触为主,少数可见缝合缝或裂缝,缝内部分充填白云石或方解石。晶体表面分较脏或较干净两种,结合镜下、地化特征认为,较干净的白云岩(呈砂糖状)主要为热液成因,较脏白云岩显示为埋藏成因。部分可见硅质充填,小部分白云岩遭受不同程度的去白云岩化作用。

3.3 中晶白云岩

此类白云岩是古城地区的主要白云岩类型,占比 34% 左右,岩心以浅灰色或灰白色为主,呈透镜状、条带状或中薄层状产出。晶体表面分较脏或较干净两种。晶体以曲面、他形、半自形为主,部分可见晶面较脏的雾心亮边结构、波状消光特征(图 2d)。晶粒间凹凸接触、镶嵌接触、线接触均见,结构均一,岩性致密,局部见角砾状构造。阴极发光显微镜下呈弱发光、暗红色—红色发光。

3.4 粗晶白云岩

此类白云岩分布极少,晶体粗大,晶粒一般 0.5mm 左右,大于 1.0mm 的非常少,包括粗—中晶白云岩、粗晶白云岩。晶形以曲面、半自形、自形为主,部分可见雾心亮边结构、波状消光特征(图 2e)。晶粒间以凹凸接触、缝合接触为主,局部可见晶间溶孔、角砾状构造。部分样品中白云石具双数特征,粗大的白云石包围细小的白云石晶体,暗示着重结晶的影响。

3.5 硅质岩/硅质白云岩

较粗粒白云岩薄片往往可见到硅质充填(图 2f),或白云岩发现明显的硅化,形成硅质白云岩或硅质岩,而细粒白云岩薄片中硅质充填则相对较少。硅质多为隐晶质,局部富集,偶见伴有自生石英、重晶石等热液矿物。

4 稀土元素测试数据分析

表 1 列出了白云岩及缝洞充填物的测试结果,表 2 为作为对比的泥晶灰岩的测试结果。

4.1 REE 总量

稀土元素总量不仅能反映岩石中杂质含量多少,还能体现各种成岩流体来源及其互相作用的结果。本文各类样品 REE 总量均非常低(表 1,图 3a),说明样品基本不受黏土等杂质的影响,实验数据可靠。各类白云岩及缝洞充填物稀土总量为 0.885~13.557 $\mu\text{g/g}$,平均为 4.337 $\mu\text{g/g}$,投点大多位于图左侧(图 3a)。与对比测试的 5 个泥晶灰岩样品稀土总量 4.794 $\mu\text{g/g}$ 相似,说明白云岩化过程稀土元素没有发生明显迁移贫化,这与鄂尔多斯盆

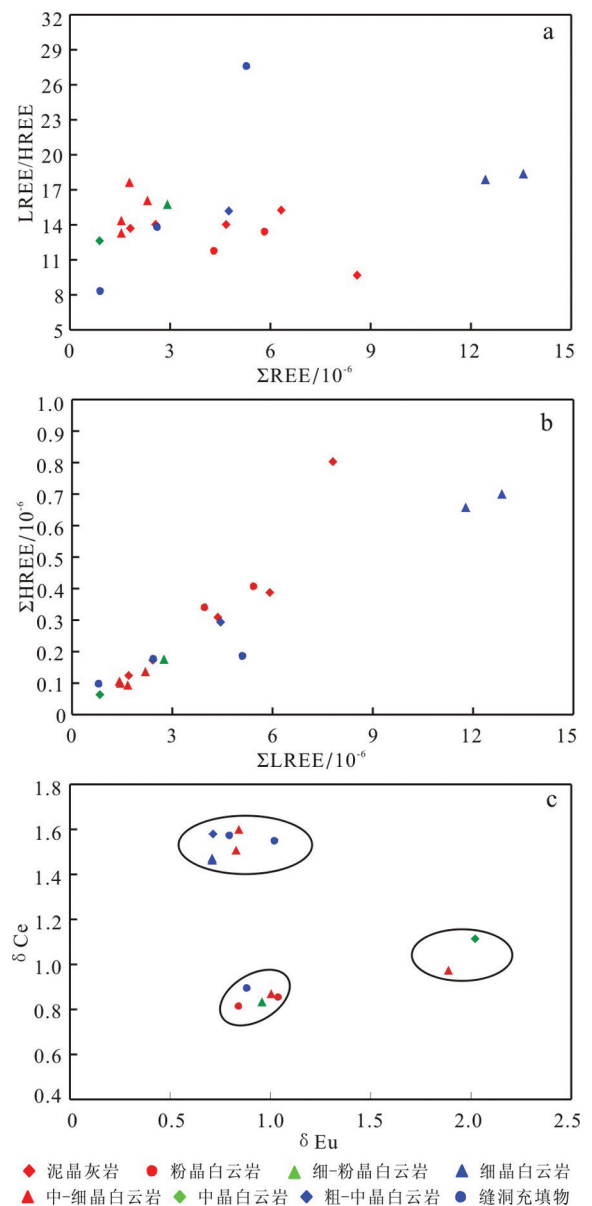


图 3 古城地区碳酸盐岩稀土元素地化特征

Fig.3 REE geochemical characteristics of carbonate rocks in Gucheng area

表 1 古城地区碳酸盐岩样品稀土元素含量及特征参数

Table 1 REE contents and characteristic parameters of carbonate rocks in Gucheng area																			稀土元素质量单位: $\mu\text{g/g}$		
序号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	δCe	δEu	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$
1	缝洞方解石	0.545	1.376	0.102	0.319	0.080	0.018	0.013	0.069	0.014	0.035	0.007	0.033	0.006	2.617	2.440	0.177	13.785	1.571	0.796	1.022
2	缝洞方解石	0.229	0.330	0.043	0.165	0.035	0.009	0.006	0.034	0.007	0.023	0.003	0.022	0.003	0.909	0.811	0.098	8.276	0.895	0.884	0.644
3	缝洞方解石	1.083	2.944	0.240	0.654	0.145	0.033	0.014	0.082	0.014	0.035	0.005	0.030	0.005	5.284	5.099	0.185	27.562	1.548	1.022	2.234
4	粗-中晶白云岩	0.944	2.560	0.201	0.587	0.139	0.027	0.021	0.109	0.021	0.061	0.011	0.061	0.010	4.752	4.458	0.294	15.163	1.578	0.713	0.958
5	中晶白云岩	0.181	0.339	0.037	0.166	0.069	0.028	0.005	0.023	0.003	0.013	0.002	0.017	0.002	0.885	0.820	0.065	12.615	1.114	2.022	0.659
6	中-细晶白云岩	0.390	0.939	0.072	0.214	0.051	0.011	0.007	0.037	0.007	0.020	0.003	0.018	0.003	1.772	1.677	0.095	17.653	1.509	0.830	1.341
7	中-细晶白云岩	0.319	0.526	0.066	0.374	0.117	0.047	0.010	0.032	0.007	0.026	0.003	0.020	0.003	1.550	1.449	0.101	14.347	0.974	1.890	0.987
8	中-细晶白云岩	0.475	1.255	0.094	0.277	0.071	0.015	0.009	0.050	0.010	0.029	0.005	0.029	0.004	2.323	2.187	0.136	16.081	1.598	0.844	1.014
9	中-细晶白云岩	0.180	0.354	0.061	0.768	0.049	0.013	0.007	0.040	0.008	0.021	0.004	0.024	0.003	1.532	1.425	0.107	13.318	0.870	1.002	0.464
10	细晶白云岩	2.595	6.590	0.557	1.603	0.360	0.064	0.046	0.241	0.047	0.137	0.024	0.141	0.022	12.427	11.769	0.658	17.886	1.472	0.708	1.139
11	细晶白云岩	2.873	7.213	0.609	1.703	0.388	0.070	0.051	0.255	0.050	0.149	0.026	0.147	0.023	13.557	12.856	0.701	18.340	1.465	0.709	1.210
12	细-粉晶白云岩	0.401	0.742	0.132	1.363	0.090	0.023	0.013	0.063	0.013	0.036	0.006	0.038	0.006	2.926	2.751	0.175	15.720	0.834	0.960	0.653
13	细-粉晶白云岩	0.875	1.590	0.290	2.434	0.201	0.045	0.029	0.153	0.029	0.081	0.014	0.086	0.014	5.841	5.435	0.406	13.387	0.815	0.841	0.630
14	粉晶白云岩	0.553	1.124	0.203	1.884	0.165	0.045	0.023	0.127	0.024	0.066	0.012	0.075	0.012	4.313	3.974	0.339	11.723	0.853	1.042	0.456

注:下标 N 代表白云岩样品稀土元素的泥晶灰岩标准化值, $\Sigma\text{REE}/\Sigma\text{HREE}$ 代表总稀土、轻稀土、重稀土元素量。

$\delta\text{Ce} = 2 \times \text{Ce}_N / (\text{La}_N + \text{Pr}_N), \delta\text{Eu} = 2 \times \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Tb}_N)$ 。

表 2 古城地区中下奥陶统泥晶灰岩稀土元素含量及特征参数

Table 2 REE contents and characteristic parameters of Middle—Lower Ordovician micrite in Gucheng area															稀土元素质量单位: $\mu\text{g/g}$					
序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	$\delta\text{Ce}_{\text{NASC}}$	$\delta\text{Eu}_{\text{NASC}}$	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{NASC}}$
15	0.621	1.083	0.130	0.460	0.091	0.023	0.012	0.067	0.012	0.035	0.006	0.035	0.005	2.580	2.408	0.172	14.000	0.827	1.233	1.719
16	1.641	2.652	0.293	1.074	0.208	0.061	0.029	0.146	0.027	0.083	0.013	0.078	0.012	6.317	5.929	0.388	15.281	0.822	1.393	2.038
17	1.251	1.914	0.201	0.795	0.150	0.043	0.021	0.114	0.021	0.069	0.011	0.063	0.011	4.664	4.354	0.310	14.045	0.813	1.359	1.924
18	2.160	3.315	0.410	1.512	0.321	0.083	0.053	0.277	0.057	0.179	0.031	0.176	0.030	8.604	7.801	0.803	9.715	0.761	1.128	1.189
19	0.402	0.751	0.092	0.354	0.069	0.016	0.009	0.047	0.009	0.025	0.005	0.024	0.004	1.807	1.684	0.123	13.691	0.850	1.137	1.623

注:下标 NASC 代表泥晶灰岩样品稀土元素的北美页岩(NASC)标准化值, $\Sigma\text{REE}/\Sigma\text{HREE}$ 代表总稀土、轻稀土、重稀土元素量。

$\delta\text{Ce}_{\text{NASC}} = 2 \times \text{Ce}_{\text{NASC}} / (\text{La}_{\text{NASC}} + \text{Pr}_{\text{NASC}}), \delta\text{Eu}_{\text{NASC}} = 2 \times \text{Eu}_{\text{NASC}} / (\text{Sm}_{\text{NASC}} + \text{Tb}_{\text{NASC}})$ 。

地^[13]、川东^[7,8,10]、塔里木盆地^[5]、川西^[11]白云岩化过程稀土元素迁移特征有显著差别。

白云岩化过程常常造成原岩 REE 发生显著下降,而本文白云岩样品的 REE 含量与泥晶灰岩样品基本一致,说明有其他流体参与了白云岩化过程。而自然界大部分流体(海水、大气水、地下水等)稀土含量都非常低,难以明显改变岩石 REE 组成,而热液、浓缩海水中稀土元素含量则很高。综合判断,可能有热液、浓缩海水等参与了白云岩化过程。

4.2 轻稀土和重稀土

轻稀土、重稀土的比值反映了稀土元素富集亏损程度,是衡量稀土元素迁移的重要指标。从图 3b 可以看出,大多数白云岩样品、泥晶灰岩样品轻、重稀土元素含量相关性明显。所有白云岩样品、缝洞充填物与泥晶灰岩样品的轻稀土总量分别为 0.811~12.856、1.684~7.801 $\mu\text{g/g}$,重稀土总量分别为 0.065~0.701、0.123~0.803 $\mu\text{g/g}$,在图 3b 中均投点于左下角。以上事实说明,白云岩化具有很强的继承性。

4.3 δCe 和 δEu

在不同的成岩环境中,Ce(铈)和 Eu(铕)常发生化学价位变化,呈现出不同的化学性质,从而能够提

供成岩环境方面的信息。缝洞充填物 δCe 为 0.895~1.571(表 1,图 3c),平均为 1.338,表现出弱负异常至正异常特征。晶粒白云岩 δCe 为 0.815~1.598(表 1,图 3c),平均为 1.189,表现出负异常至正异常特征。 δCe 总体上分为三部分:0.815~0.895、0.974~1.114、1.465~1.599(图 3c),第一个区间的样品 δCe 均负,表明白云岩形成于开放的氧化环境,第三个区间 δCe 均正,表明此类岩石形成于还原环境或受还原性流体作用。

白云岩均形成于封闭的还原环境。

缝洞充填物 δEu 为 0.796~1.022(表 1,图 3c),平均为 0.901,表现为负异常至弱正异常特征。晶粒白云岩 δEu 为 0.708~2.022(表 1,图 3c),平均为 1.051,表现出负异常至正异常特征。 δEu 总体上分为三部分:0.708~0.884、0.960~1.042、1.890~2.022(图 3c)。明显负异常的第一部分样品可能形成于埋藏、大气淡水等还原环境^[20],第三部分样品则可能形成于高温环境^[21]。

4.4 REE 配分模式

本文 5 个泥晶灰岩样品经北美页岩(NASC)^[22]标准化后(表 2), $\delta\text{Ce}_{\text{NASC}}$ 相对集中,为 0.761~0.850,表现出负异常特征, $\delta\text{Eu}_{\text{NASC}}$ 也相对集中,为 1.128~1.393,表现出正异常特征,泥晶灰岩 REE、

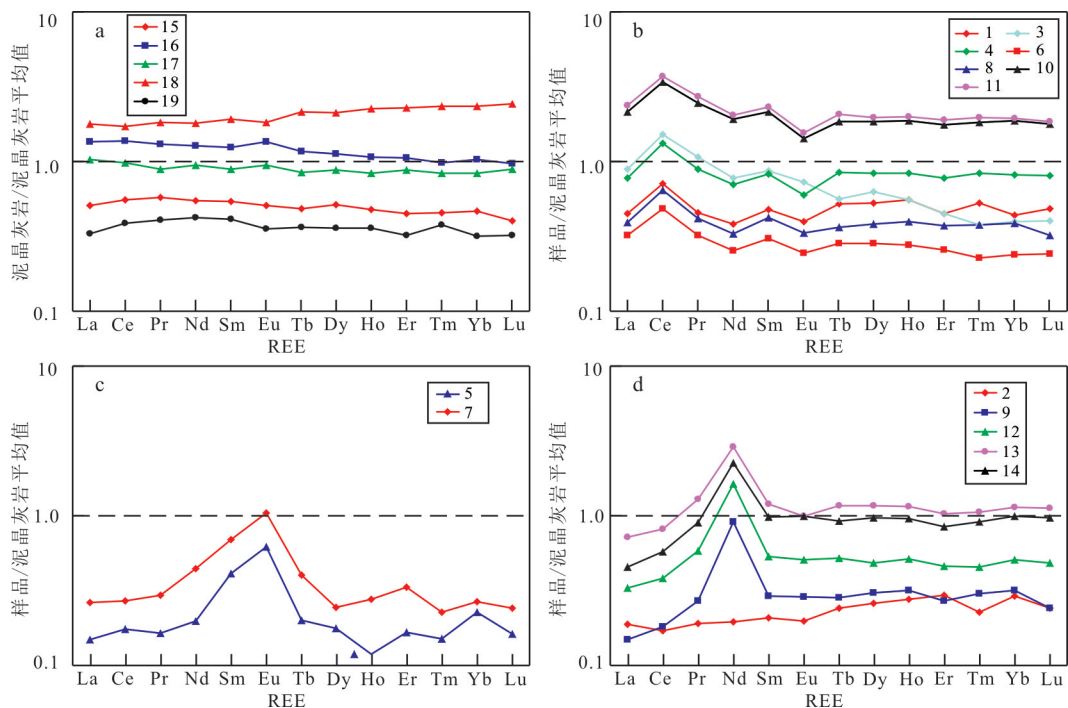


图 4 古城地区碳酸盐岩稀土元素配分模式

Fig.4 Normalized REE distribution patterns of carbonate rocks in Gucheng area

配分模式、 $\delta\text{Ce}_{\text{NASC}}$ 、 $\delta\text{Eu}_{\text{NASC}}$ 与现代海水经 NASC 标准化后特征相似^[23,24],说明泥晶灰岩很少受到后期成岩改造。同时,泥晶灰岩样品均形成于正常浅海相环境,其平均稀土量 $4.794\mu\text{g/g}$ 也与碳酸盐岩稀土量相当。因此,可用泥晶灰岩来近似替代沉积时期古海水的相关信息。

沉积岩稀土元素标准化通常采用北美页岩 (NASC)^[22]、澳大利亚后太古宙页岩 (PAAS)、球粒陨石、太平洋海水为标准值,而白云岩的形成与上述标准样品没有任何关系,只与沉积期海水和后期改造有关。用泥晶灰岩稀土元素平均值来替代沉积期古海水的相关值,进而对白云岩样品进行标准化(表 1、图 4b、c、d),可以减小沉积期的影响,突出后期流体的影响。

不同的白云岩化流体具有不同的 REE 配分模式、特征参数,因此可以通过其推断流体的性质和来源。以很少遭受后期改造的泥晶灰岩为标准,将所有测试样品进行标准化后,主要可分为以下三种类型(图 4b、c、d)。

(1)负 δEu 型(图 4b):部分缝洞充填物、较粗粒白云岩呈现明显的 δEu 负异常特征, δEu 为 $0.708\sim 1.022$,平均为 0.803 ,而其 δCe 表现为明显的正异常,为 $1.465\sim 1.598$,平均为 1.534 。该类样品表现出较弱的轻稀土富集、重稀土亏损特征(图 4b), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $0.958\sim 2.234$,平均为 1.274 ,与泥晶灰岩类似(图 4a),说明白云岩化流体与同期海水相关^[20]。

(2)正 δEu 型(图 4c):两个粗粒白云岩样品呈现出明显的 δEu 正异常特征, δEu 为 $1.890\sim 2.022$,平均为 1.956 ,其 δCe 则均为 1.0 左右,没有表现出异常。

(3)负 δCe 型(图 4d):部分缝洞充填物、细粒、微粒白云岩呈现明显的负 δCe 特征,其 δCe 为 $0.815\sim 0.895$,平均为 0.853 ,而 δEu 均为 1.0 左右,没有表现出异常。同时,该类样品均表现出明显的轻稀土亏损、重稀土富集特征, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $0.456\sim 0.653$,平均为 0.570 。同时,该类型样品大多表现出 δNd 正异常特征, δNd 为 $0.984\sim 3.252$,平均为 2.370 。

5 白云岩成因探讨

研究表明,稀土元素具有一定的金属元素的性质,随着成岩环境的变化,某些元素常发生价位的改变,进而导致其发生溶解或沉淀,从而造成元素的异

常,以 Ce 和 Eu 最明显。环境的氧化还原性能够造成 Ce 价位发生显著变化,从而使流体 Ce 出现负异常^[25,26],也就是说,环境氧化性越强,Ce 的异常值就越高。而在低温碱性环境中, Eu^{3+} 容易被还原为易溶的 Eu^{2+} ,从而使 Eu 迁移贫化,形成 Eu 负异常,在高温环境中, Eu^{3+} 容易被氧化为难溶的 Eu^{4+} ,从而使 Eu 出现正异常^[26,27]。

REE 及其配分模式和 Ce、Eu 等元素的异常特征,常因不同的白云岩化流体和过程而呈现不同的特征,进而通过其可以探讨白云岩化流体和白云岩的成因。这已经成为一种相对成熟的方法,并在多个盆地中广泛使用^[2-6,12,14,15]。

5.1 埋藏白云岩化模式

图 4b 样品大多具有粗粒结构、较脏的晶面、雾心亮边特征、半自形—他形晶体、明显的 δEu 负异常特征,表明其形成于低温碱性还原环境。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $0.958\sim 2.234$,平均值为 1.274 ,表明轻稀土、重稀土富集程度相似。图 4b 样品与泥晶灰岩具有相似的配分模式,均为一条近水平线,表明其为交代成因,白云岩化流体与原岩沉积时海水相关。根据赵文智等^[2]、郑剑锋等^[3]判识标志,可进一步推测其为埋藏白云岩化成因,白云岩化流体为盆内寒武系蒸发岩间封存的海源性流体^[4]。后期,随着时间、深度的变迁,细粒度白云岩可能遭受其他白云岩化流体再作用,形成较粗粒度白云岩^[2]。

5.2 热液白云岩化模式

古生代以来,塔里木盆地发生多次构造热事件,形成一系列结晶岩分布于盆地及周缘^[27],其中以二叠纪大火成岩省最为有名。在盆地内多口井奥陶系发现了结晶岩、萤石、大理岩、硅质岩、自生石英等^[4](图 2),进一步证实了构造热事件的存在。这些侵入奥陶系的结晶岩可能会对白云岩的形成起到显著作用。

由酸性热液作用形成的白云岩往往具有 δEu 正异常的特征^[7,23,26]。研究区粗粒白云岩样品 δEu 为 $1.890\sim 2.022$,配分曲线呈显著的倒 V 字形(图 4c),表明这些样品可能形成于热液环境。同时,这些白云岩常具有角砾状或条带状构造、残余灰质成分、横向不连续、岩心和镜下可见热液矿物、晶粒相对粗大、马鞍状白云石、波状消光等,这些均是热液白云岩的典型岩石学特征,进一步佐证了上述结论。此外,蓬莱坝组白云岩 δEu 异常、REE 及其配分模式也与前人总结的塔里木盆地热液白云岩的配分模

式一致^[2,3]。

5.3 蒸发泵白云岩化模式

早奥陶世塔里木地块位于南纬 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ^[28],并持续向北漂移,沉积环境处于半局限台地向台地边缘—开阔台地过渡(图1),热带环境很容易形成蒸发泵模式的白云岩,类似今天的波斯湾,这种环境下形成的白云岩往往具有 δCe 负异常特征^[2]。该模式的白云岩形成温度低、结晶速度快、盐度高,因此晶体粒度小,多形成泥粉晶、细晶白云岩。

图4d样品白云岩均具有晶粒细小、自形程度差、以他形为主、晶面较脏、 δCe 负异常等特征,表明其可能形成于低温的蒸发泵环境。这种机制形成的白云岩广泛分布于塔里木盆地寒武—奥陶系^[2,3]。

细粒白云岩的纵横向展布也证明蒸发泵模式的大量存在。纵向上,由蓬莱坝组至鹰山组沉积环境逐渐变开阔,蒸发作用减弱,海水盐度逐渐降低,导致由下而上细粒白云岩比例逐渐减小,直至鹰二段基本不含白云岩。横向上,向陆一侧海水流动不畅,盐度增大,细粒白云岩厚度也逐渐增厚,向海一侧则相反,古城4井附近及向东白云岩厚度急剧减小并快速消失。

此外,图4d部分样品存在一定程度的 δEu 负异常,表明前期形成的较细粒白云岩后期又经历了埋藏白云岩化。

综上所述,古城地区蓬莱坝组白云岩成因多样,干热的气候和海平面频繁的波动使蒸发作用非常强烈,海水底部高盐度粒间水交代文石颗粒,形成较细粒的结晶白云岩。随着埋藏深度逐渐增加,地层温度逐渐升高还原性增强,埋藏的海源性流体和热液流体可能形成新的、粒度较粗的白云岩。同时,前期形成的较细晶的白云岩在后期可能继续接受改造,形成较粗晶白云岩。

6 结论

(1)根据稀土元素配分特征,古城地区蓬莱坝组白云岩可分为三种类型:负 δEu 型、正 δEu 型、负 δCe 型。

(2)研究区蓬莱坝组较细粒白云岩均具有自形程度差、以他形为主、晶面较脏、 δCe 负异常等特征,主要形成于蒸发泵机制。而早期形成的白云岩在埋藏过程中可能受到埋藏流体、热液流体的再作用。

(3)研究区蓬莱坝组较粗粒白云岩常形成于埋藏环境或热液环境,前者往往具有 δEu 负异常特

征,而后者则具有 δEu 正异常特征。

参考文献 (References)

- [1] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, 1989, 21: 169-200.
- [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] 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.]
- [4] 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.]
- [5] 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.]
- [6] 张振伟. 塔里木盆地古城构造带中下奥陶统白云岩稀土元素地球化学特征及其成因[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(2): 368-373. [ZHANG Zhenwei. REE geochemical characteristics and genesis of the Middle-Lower Ordovician Dolomite in the Gucheng low uplift of the Tarim Basin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(2): 368-373.]
- [7] 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 Sedimentary Sinica*, 2018, 36(1): 1-11.]
- [8] 李小可, 黄思静, 黄可, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组白云石化海相流体的地球化学依据[J]. *地质勘探*, 2016, 36(10): 35-44. [LI Xiaoke, HUANG Sijing, HUANG Keke, et al. Geochemical characteristics of Middle Permian Qixia Fm dolomitized marine fluids in the Sichuan Basin [J]. *Nature Gas and Industry*, 2016, 36(10): 35-44.]
- [9] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010. [HUANG Sijing. Carbonate diagenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.]

- [10] 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.]
- [11] 张文. 川西-北地区中二叠统白云岩储层成因及控制因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [ZHANG Wen. The Dolostone Reservoirs from the Middle Permian in northwestern Sichuan Basin: genesis, controlling factors [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.]
- [12] 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.]
- [13] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2230-2238. [SU Zhongtang, CHEN Hongde, XU Fenyang, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2230-2238.]
- [14] 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]. 古地志学报, 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.]
- [15] 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.]
- [16] 贾承造. 塔里木盆地及周边地层: 各纪地层总结各分区地层表[M]. 北京: 科学出版社, 2004. [JIA Chengzao. Stratigraphy of the Tarim Basin and Adjacent Areas: Summary of the Stratigraphy [M]. Beijing: Science Press, 2004.]
- [17] 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.]
- [18] 冯增昭, 鲍志东, 吴茂炳, 等. 塔里木地区奥陶纪岩相古地理[J]. 古地志学报, 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.]
- [19] 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.]
- [20] 陈永权, 徐彦龙, 张艳秋, 等. 塔中-巴楚地区下奥陶统云灰岩地球化学与成因探讨[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1344-1353. [CHEN Yongquan, XU Yanlong, ZHANG Yanqiu, et al. Geochemistry and genesis research on Lower Ordovician limestones-dolostones transitional rocks in Tazhong-Bachu Uplift, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7): 1344-1353.]
- [21] 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): 28-36. [ZHU Dongya, JIN Zhijun, HU Wenxuan. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim Basin [J]. Science in China: Earth Science, 2010, 40(2): 28-36.]
- [22] 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.
- [23] Bau M and 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.
- [24] Zhang J and 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.
- [25] Frimmel H E. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator [J]. Chemical Geology, 2009, 258: 338-353.
- [26] 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.
- [27] 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.]
- [28] 方大钧, 沈忠悦. 塔里木地块各时代视磁极及板块漂移[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2001, 28(1): 100-106. [FANG Dajun, SHEN Zhongyue. Phanerozoic apparent polar-wander paths of Tarim and plate motion [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2001, 28(1): 100-106.]