

四川盆地川西坳陷雷口坡组四段 稀土元素地球化学特征及意义

梁世友^{1,2}, 陈迎宾², 赵国伟², 王彦青², 胡 焯²

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要: 沉积物中稀土元素配分模式及特征参数能够很好地反映沉积环境及流体性质与来源, 应用于油气地质研究中可辅助判断烃源岩、储层沉积环境及油气来源等。川西坳陷雷口坡组四段碳酸盐岩稀土元素测试结果表明, 稀土元素总量较低, 轻、重稀土分异明显, 具有明显的 δCe 负异常和 δEu 正异常。分析认为, 低稀土元素总量、 δCe 负异常反映了雷四段沉积时为相对开放的弱氧化低能环境, 有利于成烃生物的繁育和生长, 可为雷四段烃源岩的形成提供物质基础; 显著的 δEu 正异常表明了后期强还原环境下的流体活动, 对有机质的保存有着重要作用。轻稀土富集、重稀土亏损、显著的 δEu 正异常以及与热液流体相似的稀土元素配分模式, 表明川西雷四段经历过后期的热液蚀变与改造, 而热液运移的通道也可为深层油气向上运移提供良好的输导条件。

关键词: 稀土元素; 地球化学特征; 碳酸盐岩; 雷口坡组四段; 川西坳陷; 四川盆地

中图分类号: P595

文献标识码: A

Geochemical characteristics of rare earth elements and their geological significance in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin

Liang Shiyu^{1,2}, Chen Yingbin², Zhao Guowei², Wang Yanqing², Hu Ye²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The composition and characteristic parameters of rare earth elements in sediments provided sedimentary environment as well as fluid and source information, which can be used to judge the sedimentary environment of source rocks and reservoirs and the sources of oil and gas. The tests of rare earth elements in carbonate rocks from the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in the western Sichuan Basin indicated that the total REE content was low. The LREE and HREE differentiation were obvious. Obvious negative δCe and positive δEu anomalies were observed. The low total REE content and negative δCe anomaly reflected a relatively open and weakly oxidizing low-energy environment when the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation was deposited. This environment was favorable for the breeding and growth of hydrocarbon generation organisms, hence providing a material basis for the formation of hydrocarbon source rocks in the Middle Triassic Leikoupo Formation. The positive δEu anomaly suggested a strongly reducing environment for fluid activity during the late period, which was favorable for organic matter preservation. Enriched LREE, poor HREE, positive δEu anomaly and a REE distribution pattern similar to hydrothermal fluid indicated that the fourth member of Leikoupo Formation experienced late hydrothermal alteration. Hydrothermal migration channels also provided good permeability for deep oil and gas migration.

Key words: rare earth elements; geochemical characteristics; carbonate; fourth member of Leikoupo Formation; western Sichuan Basin; Sichuan Basin

稀土元素(REE)是重要的地球化学示踪指标之一,其总量、轻、重稀土元素分馏程度可用于辅助判断油气来源和运移路径等^[1-2]。而稀土元素中

Eu 和 Ce 是变价元素,它们在岩石中表现出的正、负异常能够反应沉积环境及流体性质与来源,从而为在低勘探程度区研究烃源岩沉积环境、储层成因

演化等提供依据^[3-6]。

近年来,川西坳陷中三叠统雷口坡组四段(简称雷四段 T_2l^4)先后在新场构造、金马—鸭子河构造获得天然气突破,展示出巨大的勘探潜力^[7-9]。但由于总体勘探程度较低,对于雷四段烃源岩形成条件、天然气来源等没有明确认识,制约了勘探进程。本文通过对川西6口雷口坡组钻井岩心稀土元素的系统测试,分析其地球化学特征,并结合区域沉积、构造、成藏等最新勘探及研究成果,探讨其油气地质意义,以期为川西雷四段沉积环境、天然气来源等基础地质问题的研究提供依据。

1 地质背景

川西坳陷处于上扬子地台西北缘。雷四段沉积时期,以局限—蒸发台地相为主,台内发育蒸发潮坪、潟湖、台内滩等沉积微相;向西现今龙门山及前缘隐伏构造带发育台地边缘相沉积。拉丁期末(雷四段沉积末期)的“印支早期运动”使四川海域整体隆升,海平面下降,雷口坡组暴露出地表^[10]。川西地区抬升幅度相对较小,整体处于四川盆地“印支不整合面”西部古斜坡区,仅雷四段上部遭受差异剥蚀形成古风化壳,厚度平均在50~80 m之间^[11]。之后,川西地区先后经历了印支晚期的“安县构造运动”、燕山期构造运动及喜马拉雅构造运动,形成了雷四段现今的“两凹(元通—安德凹陷,绵竹凹陷)、两隆(金马—鸭子河—安县隆起带,新场隆起带)、两斜坡(广汉—中江斜坡,文星—绵阳斜坡)”的构造格局。

钻探揭示,川西坳陷雷四段按岩性组合可进一步划分为3个亚段:下亚段厚约180~200 m,以厚大膏岩为主,夹部分深色微晶白云岩,在川西大部分地区保留齐全;中亚段厚约70~80 m,为膏岩、微晶白云岩不等厚互层,在回龙1井以东附近被剥蚀尖灭;上亚段厚约90~120 m,岩性主要为微—细晶白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩、(藻屑)砂屑灰岩,主要分布在川合100井以西,向东逐渐被剥蚀尖灭。雷四段储层发育在中、上亚段,尤其以上亚段最好,平均孔隙度一般大于4%,主要为灰岩、白云岩溶蚀孔隙型储层。

2 样品采集与测试

本次研究用于测试分析的样品采自川西坳陷TS1、XS1等6口近年来完钻井的雷四段中、上亚段岩心,共计15块(图1)。样品岩性为灰岩、白云岩,测试样品均为全岩样品。样品均由中国石化石

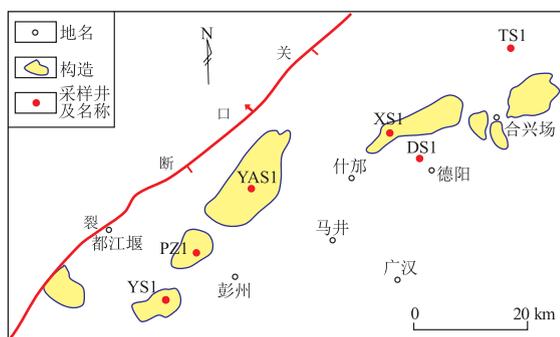


图1 采样井位置示意

Fig.1 Location of sampling wells

油勘探开发研究院无锡石油地质研究所进行化学处理及测试,测试数据准确可信(表1)。

勘探及研究表明,川西坳陷雷四段沉积时主要为局限—蒸发台地环境,为海相沉积,故本次研究采用澳大利亚太古宙页岩(PAAS)对岩样REE结果进行标准化处理。并通过相关经验公式^[12]计算稀土元素中的特征参数(表1),从而开展稀土元素地球化学特征及其配分模式的研究。

3 稀土元素地球化学特征

3.1 Σ REE 和 Σ LREE/ Σ HREE 特征

川西雷四段灰岩、白云岩的 Σ REE均较低,介于0.36~8.40 $\mu\text{g/g}$ 之间,平均值为1.6 $\mu\text{g/g}$ (表1),比PAAS的 Σ REE平均值(184.77 $\mu\text{g/g}$)低2个数量级,表明川西雷四段无论是沉积过程还是后期成岩过程中受到陆源物质的影响极其微弱。

Bau等^[14-16]通过对海底高温流体、热液流体稀土配分模式及轻、重稀土元素分馏影响因素研究认为,颗粒对高电价、大半径稀土元素离子吸附作用较强,因此导致海底高温流体中重稀土元素浓度降低,表现出轻稀土相对富集、重稀土相对亏损。当热液流体作用于碳酸盐岩时,酸性流体中稀土元素主要与氯离子络合,而氯离子与轻稀土元素的络合物强于重稀土元素,岩石中的轻稀土元素会向流体中迁移,导致轻稀土元素相对富集,使得热液流体表现出轻稀土富集、重稀土亏损的特征。因此,通过实测岩石样品 Σ LREE/ Σ HREE值所反映出的轻重稀土元素分馏程度与热液、海水等成岩流体轻重稀土元素分馏程度比较,可以作为判断成岩流体来源的一个参数。

川西雷四段碳酸盐岩 Σ LREE/ Σ HREE在4.92~11.44之间,平均为7.39(表1),反映轻、重稀土元素分异明显,具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征。比较不同自然流体中 Σ LREE/ Σ HREE地

表 1 四川盆地川西坳陷雷口坡组四段碳酸盐岩 REE 测试结果及特征参数
Table 1 REE analysis results and related characteristic parameters of carbonate rocks from the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin

样品号	岩性	采样井名	样品深度/m	元素质量分数/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)																$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	δCe	δEu	
				Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				ΣREE
DS1-1	灰质白云岩	DS1	6 176	1.02	0.29	0.13	0.20	0.03	0.09	0.03	0.11	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.66	7.74	0.84	23.36
XS1-1	灰质白云岩	XS1	5 622	1.70	0.32	0.08	0.14	0.03	0.06	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.39	6.57	0.90	9.18
TS1-1	灰质白云岩	TS1	5 744	1.30	0.37	0.23	0.38	0.05	0.18	0.05	0.37	0.06	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	1.42	9.11	0.82	7.64
TS1-2	灰质白云岩	TS1	5 746	0.64	0.36	0.22	0.42	0.06	0.19	0.06	0.13	0.05	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	1.21	7.09	0.93	13.44
PZ1-1	砂屑灰岩	PZ1	5 764	0.99	0.30	0.14	0.23	0.04	0.11	0.03	0.04	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.67	7.64	0.93	3.91
PZ1-2	藻灰岩	PZ1	5 826	0.68	0.32	0.22	0.36	0.05	0.15	0.04	0.06	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.96	9.52	0.84	46.41
YS1-1	生屑灰岩	YS1	6 126.1	0.54	0.30	0.12	0.21	0.03	0.11	0.03	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.60	6.39	0.95	1.78
YS1-2	灰质白云岩	YS1	6 195.4	0.75	0.60	0.47	0.87	0.11	0.41	0.10	0.30	0.12	0.01	0.07	0.01	0.04	0.02	0.04	0.01	2.60	7.03	0.69	7.38
YS1-3	生屑灰岩	YS1	6 172	0.60	0.26	0.10	0.15	0.03	0.08	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.44	6.94	1.00	1.55
YS1-4	灰质白云岩	YS1	6 221	0.39	0.30	0.14	0.27	0.04	0.13	0.04	0.03	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.77	5.50	0.88	6.74
YAS1-1	白云质灰岩	YAS1	5 725	0.93	0.94	2.08	3.83	0.38	1.20	0.20	0.03	0.24	0.03	0.13	0.03	0.09	0.03	0.11	0.02	8.40	11.44	0.90	15.84
YAS1-2	生屑灰岩	YAS1	5 732.5	0.44	0.28	0.07	0.10	0.02	0.06	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.36	4.92	0.79	3.56
YAS1-3	白云质灰岩	YAS1	5 742.5	0.54	0.78	0.72	1.52	0.18	0.65	0.16	0.04	0.15	0.02	0.11	0.02	0.07	0.02	0.07	0.01	3.74	6.93	0.87	5.34
YAS1-4	灰质白云岩	YAS1	5 762.8	0.16	0.36	0.22	0.38	0.05	0.16	0.05	0.05	0.04	0.00	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	1.05	7.17	0.82	3.51
YAS1-5	灰质白云岩	YAS1	5 777.8	0.06	0.34	0.15	0.29	0.04	0.13	0.04	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.76	6.83	1.07	0.81

注: $\Sigma\text{LREE}=\text{Sc}+\text{Y}+\text{La}+\text{Ce}+\text{Pr}+\text{Nd}+\text{Sm}+\text{Eu}$, $\Sigma\text{HREE}=\text{Gd}+\text{Tb}+\text{Dy}+\text{Ho}+\text{Er}+\text{Tm}+\text{Yb}+\text{Lu}$; $\delta\text{Ce}=2(\text{Ce}/\text{Ce}^*)/(\text{La}/\text{La}^*+\text{Nd}/\text{Nd}^*)$, $\delta\text{Eu}=2(\text{Eu}/\text{Eu}^*)/(\text{Sm}/\text{Sm}^*+\text{Tb}/\text{Tb}^*)$, *表示经 PAAS 标准化后的值。PAAS 值引自 McLennan^[13]。

球化学特征,河水、海水沉积物均为轻稀土亏损、重稀土富集,而与热液有关的沉积物常常具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征^[17-18]。结合 Bau 等研究成果^[14-16]及稀土总量低、无陆源混入的特征推断,川西雷四段经历过热液的蚀变与改造,造成了轻、重稀土分异明显,轻稀土富集、重稀土亏损的特征。

3.2 Ce 和 Eu 异常

由于 Ce 是一个典型的变价元素,当 pH 值在一定范围内时,如果水体为氧化环境, Ce^{3+} 就会被氧化成 Ce^{4+} ,使得 Ce^{3+} 的浓度降低,形成 Ce 的相对亏损,即 $\delta\text{Ce}<1$;如果水体缺氧, Ce^{3+} 的浓度就会增大,形成 Ce 的相对富集,此时 $\delta\text{Ce}>1$ 。因此,沉积物稀土元素中 Ce 的正、负异常能很好地反映沉积时水体的氧化—还原环境^[19]。

由 δCe 计算公式(表 1)所得川西雷四段 δCe 值介于 0.69~1.07 之间(表 1),平均 0.88,除 YAS1 井 1 个样品 δCe 略大于 1 外,均表现为 Ce 负异常。而不同岩性的 Ce 异常值分布范围相似,说明白云岩化过程未对 Ce 异常值造成影响,其异常值可反映雷四段沉积时为相对开放的弱氧化环境。

稀土元素中的 Eu 也是一个典型变价元素。研究表明, Eu 的显著正异常($\delta\text{Eu}>1$)是热液流体稀土元素组成的重要标志之一。在高温、还原条件下, Eu 主要以 Eu^{2+} 的形式存在。当热液流体作用于碳酸盐岩时, Eu^{2+} 会取代矿物中的 Ca^{2+} ,从而导致岩石出现正 Eu 异常^[20]。

依据 δEu 计算公式(表 1)所得川西雷四段碳

酸盐岩 Eu 异常值(δEu)除了 YAS1 井的 1 个样品以外,均介于 1.55~46.41 之间,平均 9.51,表现为较明显的正 Eu 异常。结合轻稀土富集、重稀土亏损的特征来看,雷四段成岩后期经历来自深部热液的蚀变与改造。

3.3 REE 配分模式

不同的 REE 配分模式代表了不同来源的自然流体,而不同程度的 Ce、Eu 异常又是流体处于不同氧化—还原环境的表征。因此,稀土元素配分模式是分析物质及流体来源的一个重要参数^[21]。川西雷四段碳酸盐岩的 REE 配分模式总体表现为轻稀土富集、重稀土亏损,弱 Ce 负异常和显著的 Eu 正异常。通过与自然界不同流体 REE 配分模式的对比可以发现,川西雷四段碳酸盐岩稀土元素与热液稀土元素具有非常类似的 REE 配分模式(图 2),反映了川西雷四段在后期成岩过程中经历过较强烈的热液蚀变与改造。

4 讨论

近期研究表明,川西雷四段天然气来自于下伏二叠系及雷口坡组本身^[25]。但由于川西嘉陵江组上部及雷四段下部发育较厚的膏盐层,因此对于下伏烃源岩生成的油气是否能运移至雷四段成藏仍缺乏地球化学证据。对于雷四段而言,实测残余有机碳丰度较低(普遍小于 0.5%),其能否形成有效烃源岩也需进一步评价。稀土元素特定的地球化学特征能够在一定程度上反映沉积环境、流体来

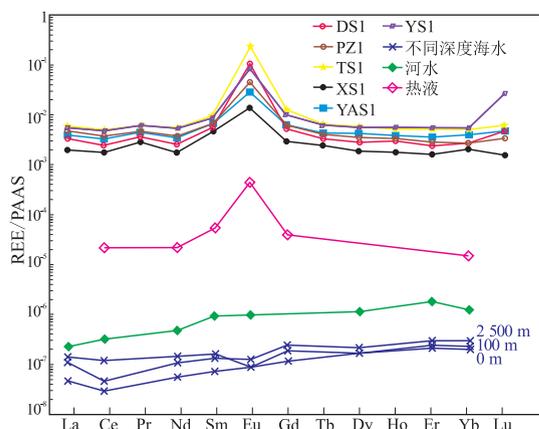


图2 四川盆地川西坳陷雷口坡组四段碳酸盐岩REE配分模式及自然界不同流体的REE配分模式
不同深度的海水REE数据引自Elderfield和Greaves^[22];
河水REE数据引自Goldstein和Jacobsen^[23];
热液REE数据引自Owen等^[24]。

Fig.2 REE distribution patterns of carbonate rocks from the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin and REE distribution patterns of different fluids in the nature

源,从而为成藏示踪、烃源岩形成条件评价提供参考依据。

4.1 稀土元素对油气运移的指示意义

根据前文所述,川西雷四段稀土元素表现出明显的热液型稀土元素地球化学特征。此外,在雷四段岩心中也发现了高温热液型萤石及闪锌矿,这些均表明雷四段在后期经历过深部热液的蚀变与改造。众所周知,热液活动及运移与构造运动和断裂通道密切相关。结合川西中三叠世以来构造发育特征^[26],雷四段沉积末期的印支早期构造运动主要以整体抬升为主,现今龙门山及山前、盆内的断裂在该时期尚未形成。须三段沉积末期的“安县构造运动”及早侏罗世的燕山早期构造运动是目前深大断裂(断穿二叠系及雷口坡组的断裂)的主要形成和发育期,推断深部热液主要是在这一时期沿深大断裂向上运移,从而造成对雷四段碳酸盐岩的改造与蚀变。而这段时期正是二叠系烃源岩大规模生排烃期,热液运移的通道也可为深层油气向上运移提供良好的输导条件。

4.2 稀土元素对雷四段烃源岩发育环境的指示意义

川西雷四段主要为蒸发潮坪—潟湖相沉积。对于此类高盐度沉积环境,之前普遍认为不具备形成烃源岩的条件。但许多学者通过对现代盐湖、咸化潟湖等研究认为,高盐度环境中,生物属种随盐度增加而减少,但生物产率并没有降低很多^[26];膏盐环境中嗜盐微生物含量高,产率也高。根据前述稀土元素特征,川西雷四段沉积时无陆源物质的输

入,为相对开放的低能、弱氧化环境,这有利于成烃生物的生长和发育,可为川西雷四段烃源岩的形成提供物质基础。目前钻探揭示出的雷四段大量发育的藻纹层灰岩、藻粒白云岩,也基本印证了这一点。同时,显著的 δEu 正异常,表明了后期强还原环境下的流体活动,这种强还原环境无疑对烃源岩的形成和有机质的保存有着重要作用。

此外,雷四段白云岩化程度控制着储层的发育。而目前对于白云岩形成机理还没有明确认识。根据雷四段稀土元素特征展示出的后期热液活动特征,可进一步考虑是否有热液流体参与白云岩化或雷四段发育与热液有关的白云岩。

参考文献:

- [1] 周国兴,赵恩好,岳明新,等. 稀土元素地球化学分析在地质学中的意义[J]. 地质与资源, 2014, 23(5): 495-499.
Zhou Guoxing, Zhao Enhao, Yue Mingxin, et al. Geological significance of rare earth elements in geochemical analysis[J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(5): 495-499.
- [2] 鲁洪波,姜在兴. 稀土元素地球化学分析在岩相古地理研究中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(1): 6-8.
Lu Hongbo, Jiang Zaixing. Application of geochemical analysis of rare earth elements in the study of lithofacies paleogeography[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1999, 23(1): 6-8.
- [3] 于炳松,陈建强,李兴武,等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面下寒武统底部硅质岩微量元素和稀土元素地球化学及其沉积背景[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 59-66.
Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Li Xingwu, et al. Rare earth and trace element patterns in bedded-cherts from the bottom of the Lower Cambrian in the northern Tarim Basin, Northwest China: Implication for depositional environments[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 59-66.
- [4] 何德军,陈洪德,钱利军. 新场地区须二段泥岩稀土元素地球化学特征及意义[J]. 断块油气田, 2013, 20(2): 157-161.
He Dejun, Chen Hongde, Qian Lijun. Geochemical characteristics of rare earth elements and its geological signification for mudstones of the second member of Xujiahe Formation in Xinchang area[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(2): 157-161.
- [5] 张晓龙,冀华丽,李媛姝,等. 微量元素分析在南堡凹陷南部的应用[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 67-69.
Zhang Xiaolong, Ji Huali, Li Yuanzhu, et al. Application of analysis on trace elements in sedimentary environment, Southern Nanpu Sag[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(2): 67-69.
- [6] 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.
- [7] 许国明,宋晓波,冯霞,等. 川西地区中三叠统雷口坡组天然

- 气勘探潜力[J].天然气工业,2013,33(8):8-14.
- Xu Guoming, Song Xiaobo, Feng Xia, et al. Gas potential of the Middle Triassic Leikoupo Fm in the western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8):8-14.
- [8] 杨克明.四川盆地西部中三叠统雷口坡组烃源岩生烃潜力分析[J].石油实验地质,2016,38(3):366-374.
- Yang Keming. Hydrocarbon potential of source rocks in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3):366-374.
- [9] 陈迎宾,胡烨,王彦青,等.大邑构造雷口坡组四段天然气成藏条件[J].特种油气藏,2016,23(3):25-29.
- Chen Yingbin, Hu Ye, Wang Yanqing, et al. Natural gas accumulation conditions of the 4th Member in Leikoupo formation of Dayi structure [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(3):25-29.
- [10] 唐宇.川西地区雷口坡组沉积与其顶部风化壳储层特征[J].石油与天然气地质,2013,34(1):42-47.
- Tang Yu. Characterization of the sedimentation of the Leikoupo Formation and the weathering crust reservoirs at the top of the formation in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1):42-47.
- [11] 罗啸泉,唐桂宾.川西龙门山前缘雷口坡组油气成藏条件[J].四川地质学报,2012,32(1):32-35.
- Luo Xiaquan, Tang Guibin. Conditions of hydrocarbon accumulation in the Leikoupo Formation, Longmenshan frontal margin, west Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2012, 32(1):32-35.
- [12] 王中刚,于学元,赵振华等.稀土元素地球化学[M].北京:科学出版社,1989:88-93,247-291.
- Wang Zhonggang Yu Xueyuan Zhao Zhenhua, et al. Geochemistry of rare earth elements[M]. Beijing, Science Press. 1989:88-93,247-291.
- [13] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rock; Influence of provenance and sedimentary processes [J]. Reviews in Mineralogy, 1989, 21:169-200.
- [14] Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium [J]. Chemical Geology, 1991, 93(3/4):219-230.
- [15] Bau M, Dulski P. Comparative-study of yttrium and rare-earth element behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids [J]. Contrib Mineral Petrol, 1995, 119(2):213-223.
- [16] Hass 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.
- [17] 罗超,徐争启,程贵,等.广西373铀矿床微量元素地球化学特征及其成因探讨[J].地质学报,2013,87(5):715-729.
- Luo Chao, Xu Zhengqi, Cheng Gui, et al. The trace element geochemical characteristics and genesis analysis of the 373 uranium deposits in Guangxi [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(5):715-729.
- [18] 王东旭,王爱国,张保国,等.鄂尔多斯盆地靖边气田马五段白云岩稀土元素特征及成岩流体示踪[J].天然气地球科学,2015,26(4):641-649.
- Wang Dongxu, Wang Aiguo, Zhang Baoguo, et al. Geochemical characteristics of rare earth element of dolostones from Ma5 member of Majiagou Formation in Jingbian Gasfield, Ordos Basin; Implications for the origin of diagenetic fluids [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4):641-649.
- [19] 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.
- [20] 余新亚,李平平,邹华耀,等.川北元坝气田二叠系长兴组白云岩稀土元素地球化学特征及其指示意义[J].古地理学报,2015,17(3):309-320.
- Yu Xinya, Li Pingping, Zou Huayao, et al. Rare earth element geochemistry of dolostones and its indicative significance of the Permian Changxing Formation in Yuanba Gasfield, northern Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(3):309-320.
- [21] 谢刚平.川西坳陷中三叠统雷口坡组四段气藏气源分析[J].石油实验地质,2015,37(4):418-422.
- Xie Gangping. Source of gas reservoirs in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4):418-422.
- [22] Elderfield H, Greaves M J. The rare earth elements in sea water [J]. Nature, 1982, 296:214-219.
- [23] Goldstein S J, Jacobsen S B. The Nd and Sr isotopic systematics of riverwater dissolved material; Implications for the sources of Nd and Sr in seawater [J]. Chemical Geology, 1987, 66:245-272.
- [24] Owen R M, Olivarez A M. Geochemistry of rare earth elements in Pacific hydrothermal sediments [J]. Marine Chemistry, 1988, 25:183-196.
- [25] 杨克明,朱宏权.川西叠覆型致密砂岩气区地质特征[J].石油实验地质,2013,35(1):1-8.
- Yang Keming, Zhu Hongquan. Geological characteristics of superposed tight sandstone gas-bearing areas in western Sichuan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1):1-8.
- [26] Kirkland D W, Evans R. Source-rock potential of evaporitic environment [J]. Bulletin of AAPG, 1981, 65:181-190.