

川东北下寒武统筇竹寺组稀土元素特征及其地质意义

——以南江杨坝剖面为例

曹婷婷^{1,2}, 徐思煌³, 王 约⁴

(1. 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; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126; 3. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074; 4. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550003)

摘要: 筇竹寺组是四川盆地重要的页岩气产层。为了揭示筇竹寺组优质烃源岩层段形成时期的物源区构造背景、物源特征及其沉积环境, 选择四川盆地南江杨坝剖面出露较完整的下寒武统筇竹寺组系统采样, 并对样品中稀土元素及微量元素进行分析。稀土元素分布模式及参数特征指示: 整体上筇竹寺组物质来源较为一致, 沉积物源区处于被动大陆边缘构造背景条件下, 母岩以沉积岩和花岗岩混合为主, 其中底部碳质页岩形成时期陆源碎屑中黏土矿物含量多。 δCe 与 V/Cr 参数指示: 筇竹寺组底部形成于厌氧的水介质环境, 中部—上部地层沉积时期属于贫氧—弱氧化的环境。

关键词: 稀土元素; 筇竹寺组; 下寒武统; 川东北

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characteristics of rare earth elements in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northeastern Sichuan Basin and its geological implications:

a case study of Yangba section, Nanjiang

CAO Tingting^{1,2}, XU Sihuang³, Wang Yue⁴

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Resource Institute, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

4. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract: The Qiongzhusi Formation is an important shale gas production layer in the Sichuan Basin. A case study was made in the Yangba section of the northeastern Sichuan Basin. Samples were collected for rare earth and trace element analyses from the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the study area so as to reveal the tectonic settings, provenance features and sedimentary environment when favorable source rocks were deposited. The distribution pattern and parameter characteristics of rare earth elements indicated that the Qiongzhusi Formation had a relatively consistent material source, mainly a passive continental margin. The parent rocks were mainly composed of sedimentary rocks and granites. When carbonaceous shale was deposited at the bottom of the Qiongzhusi Formation, the content of clay minerals increased in land sourced debris. The δCe and V/Cr parameters indicated that the bottom of the Qiongzhusi Formation was deposited in an anoxic reducing environment, while the middle and upper parts were deposited in a dysoxic-suboxic environment.

Key words: rare earth element; Qiongzhusi Formation; Lower Cambrian; northeastern Sichuan

针对四川盆地及其周缘开展的页岩气勘探评价研究, 使勘探家逐渐认识到下古生界海相高演化优质烃源岩层系是形成页岩气的物质基础。近年来随着页岩气开发力度的加大, 针对志留系龙马溪组开展了大量与页岩气富集相关的研究, 而对下部

的下寒武统地层研究程度有限。目前, 四川盆地下寒武统筇竹寺组已发现良好的页岩气显示^[1-7], 针对其开展的研究主要集中在烃源岩评价、矿物成分分析、储层表征等生、储能力的鉴别, 而对该套地层形成发育的物质来源、母岩特征、沉积构造背景等

未作深入探讨^[8-10]。

稀土元素是指化学性质相似、稳定性较好、在地壳岩石中广泛分布的一组元素组合。在地质沉积过程中,由于在海水中停留时间短,能够整体快速进入细粒沉积物,较好地保留沉积物来源区的物源特征及古沉积环境信息^[11-18]。同时,稀土元素之间由于分馏差异,因此也常常用于示踪沉积盆地的构造面貌、沉积环境以及原岩母质类型。

以四川南江杨坝剖面下寒武统为研究对象,重点开展稀土元素地球化学特征分析,并结合微量元素示踪,对筇竹寺组的物源属性、沉积—构造背景进行全面讨论,以期对筇竹寺组的页岩气勘探开发选区提供基础参数。

1 地质背景

研究区南江杨坝剖面位于四川盆地东北部,地处扬子地台北缘,在区域构造上位于米仓山南缘与大巴山断褶带北侧交界区,西部与旺苍—广元一带相接,南至巴中—达县一带^[19](图1)。区内寒武系地层出露较完整,其中筇竹寺组位于下寒武统下部,厚约470 m,其底部以黑色碳质页岩为主;中部以深灰—灰黑色的泥质粉砂岩为主,夹有灰白色薄层粉砂岩;上部为薄层钙质泥岩,部分发育薄层泥质条带灰岩。前人研究认为,司上一万源隆起导致研究区强烈沉降,同时伴随大规模海侵,沉积了浅海陆棚相环境的筇竹寺组优质烃源岩^[20-21]。

2 样品与测试

18块研究样品取自川东北南江杨坝镇下寒武统筇竹寺组露头剖面。样品采集过程中,尽可能采集未经风化的新鲜样品,其中底部样品6块(样号1~6,以碳质页岩为主),中部样品8块(样号7~14,以泥质粉砂岩为主),上部样品4块(样号15~18,以钙质泥岩、泥质灰岩为主)(图1)。

样品粉碎至200目后,再进行各类分析测试。稀土及微量元素的测试是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,分析仪器为Agilent7500a ICP-MS等离子体质谱仪。详细的样品制备与分析流程见参考文献^[22],总有机碳含量分析是在中国石化无锡石油地质研究所采用LECO CS-200仪器完成的。

3 稀土元素地球化学特征

3.1 稀土元素含量及特征

研究区筇竹寺组样品中稀土元素含量及参数

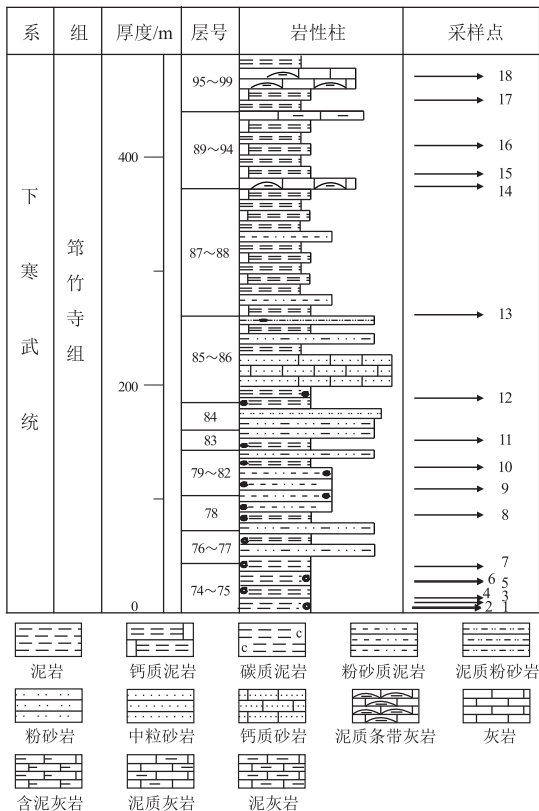
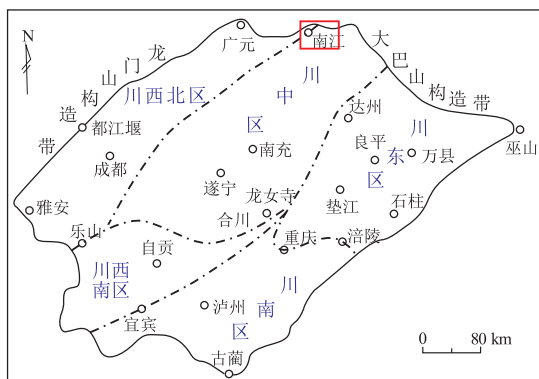


图1 川东北杨坝剖面地理位置及岩性柱状图
Fig.1 Location of Yangba section in northeastern Sichuan and lithological column

计算结果见表1和表2。整体来看,样品中稀土元素总量($\sum REE$)分布在 $(107.79 \sim 172.61) \times 10^{-6}$ 之间,均值为 143.19×10^{-6} ,总体上较接近大陆上地壳的平均稀土元素总量值(146.4×10^{-6})。同时,轻、重稀土元素含量分布不均,其中轻稀土元素含量分布在 $(98.04 \sim 158.69) \times 10^{-6}$ 之间,重稀土元素含量介于 $(9.75 \sim 18.39) \times 10^{-6}$ 之间,轻、重稀土元素比值($\sum LREE / \sum HREE$)处于6.99~11.40之间,均值为8.70,总体上反映研究区筇竹寺组轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损,也说明沉积物具有明显的陆源碎屑物质来源的属性^[23]。

同时由于岩性的差异,也造成了在筇竹寺组底部、中部、顶部样品中轻、重稀土元素富集程度不同;

表1 川东北杨坝剖面筇竹寺组稀土元素含量

Table 1 REE contents of Qiongzhusi Formation, Yangba section, northeastern Sichuan 10⁻⁶

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	30.7	55.3	6.65	22.9	3.83	0.85	3.43	0.51	3.17	0.64	1.84	0.27	1.90	0.32
2	29.9	53.7	6.56	23.0	4.24	0.86	3.63	0.55	3.33	0.70	1.89	0.27	1.88	0.29
3	30.3	58.5	7.20	25.0	4.52	0.93	3.93	0.61	3.59	0.74	2.10	0.30	2.01	0.33
4	25.7	45.2	5.35	17.9	3.15	0.74	2.66	0.42	2.51	0.53	1.51	0.24	1.62	0.26
5	30.0	54.7	6.84	24.3	4.66	0.98	3.86	0.56	3.22	0.61	1.69	0.26	1.76	0.26
6	37.7	73.5	8.96	31.9	5.49	1.14	4.25	0.62	3.59	0.74	2.03	0.31	2.04	0.34
7	29.1	59.0	7.05	26.1	5.07	1.10	4.42	0.68	3.82	0.75	2.06	0.30	1.94	0.30
8	27.6	56.5	7.17	26.7	5.64	1.13	5.05	0.75	4.29	0.83	2.10	0.33	2.05	0.30
9	27.0	53.0	6.42	23.1	4.49	1.00	4.02	0.61	3.58	0.73	1.97	0.30	1.95	0.30
10	34.6	69.5	8.46	31.5	6.20	1.34	5.39	0.8	4.51	0.87	2.42	0.36	2.26	0.36
11	32.0	62.3	7.98	29.0	5.69	1.27	5.24	0.79	4.62	0.92	2.40	0.34	2.27	0.34
12	24.8	48.1	6.04	21.8	4.26	0.91	3.68	0.57	3.29	0.67	1.85	0.27	1.71	0.28
13	33.6	66.9	8.46	30.8	6.08	1.17	5.26	0.85	4.91	1.01	2.78	0.40	2.72	0.42
14	32.1	63.9	7.74	27.9	5.41	1.07	5.00	0.77	4.69	0.92	2.50	0.39	2.60	0.38
15	31.5	61.2	7.84	29.0	5.92	1.29	5.43	0.84	4.98	1.01	2.74	0.41	2.57	0.41
16	28.9	57.1	7.26	27.1	5.44	1.10	5.08	0.78	4.79	0.94	2.52	0.37	2.53	0.38
17	26.2	52.4	6.79	25.6	5.19	1.20	5.02	0.77	4.61	0.91	2.50	0.35	2.29	0.35
18	33.4	61.5	7.57	27.0	5.10	1.06	4.87	0.77	4.67	0.98	2.71	0.42	2.78	0.43
球粒隕石 ^[25]	0.3	0.8	0.12	0.6	0.19	0.07	0.26	0.05	0.32	0.07	0.21	0.03	0.21	0.03
NASC ^[29]	32.0	73.0	7.90	33.0	5.70	1.24	5.20	0.85	5.80	1.04	3.40	0.50	3.10	0.48
PAAS ^[30]	38.0	80.0	8.90	32.0	5.60	1.10	4.70	0.77	4.40	1.00	2.90	0.40	2.80	0.43

表2 川东北杨坝剖面筇竹寺组地球化学参数分布特征

Table 2 Geochemical parameters of Qiongzhusi Formation, Yangba section, northeastern Sichuan

样号	$\Sigma REE/10^{-6}$	$\Sigma LREE/10^{-6}$	$\Sigma HREE/10^{-6}$	$\Sigma LREE/\Sigma HREE$	$(La/Sm)_N$	$(La/Yb)_N$	$(Gd/Yb)_N$	δCe	δEu	Ce_{anom}	V/Cr	$\omega(TOC)/\%$	
1	132.31	120.23	12.08	9.95	5.04	10.89	1.46	0.89	0.70	-0.060	56	4.6	3.58
2	130.80	118.26	12.54	9.43	4.44	10.72	1.56	0.88	0.65	-0.065	44	2.3	3.66
3	140.06	126.45	13.61	9.29	4.22	10.16	1.58	0.92	0.66	-0.042	51	2.6	3.91
4	107.79	98.04	9.75	10.06	5.13	10.70	1.32	0.88	0.76	-0.063	23	5.7	3.70
5	133.70	121.48	12.22	9.94	4.05	11.49	1.77	0.89	0.69	-0.065	08	8.8	3.47
6	172.61	158.69	13.92	11.40	4.32	12.46	1.68	0.93	0.70	-0.041	43	3.4	2.12
7	141.69	127.42	14.27	8.93	3.61	10.11	1.84	0.96	0.70	-0.031	93	5.0	0.59
8	140.49	124.74	15.75	7.92	3.08	9.08	1.99	0.95	0.64	-0.037	98	2.9	0.56
9	128.47	115.01	13.46	8.54	3.78	9.33	1.66	0.94	0.71	-0.039	87	2.0	0.46
10	168.57	151.60	16.97	8.93	3.51	10.32	1.92	0.95	0.69	-0.037	96	4.3	0.46
11	155.16	138.24	16.92	8.17	3.54	9.50	1.86	0.91	0.70	-0.050	92	1.8	0.29
12	118.23	105.91	12.32	8.60	3.66	9.78	1.74	0.92	0.69	-0.048	57	2.3	0.33
13	165.36	147.01	18.35	8.01	3.48	8.33	1.56	0.93	0.62	-0.042	70	1.9	0.28
14	155.37	138.12	17.25	8.01	3.73	8.32	1.55	0.95	0.62	-0.035	81	1.8	0.24
15	155.14	136.75	18.39	7.44	3.35	8.26	1.70	0.91	0.68	-0.053	92	3.0	0.13
16	144.29	126.90	17.39	7.30	3.34	7.70	1.62	0.93	0.63	-0.049	10	2.0	0.11
17	134.18	117.38	16.80	6.99	3.18	7.71	1.77	0.93	0.71	-0.049	47	2.4	0.08
18	153.26	135.63	17.63	7.69	4.12	8.10	1.41	0.90	0.64	-0.060	57	2.4	0.17

注: 稀土元素总量 $\Sigma REE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu + Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu$; 轻稀土元素含量 $\Sigma LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu$; 重稀土元素含量 $\Sigma HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu$; $(La/Sm)_N$ 、 $(La/Yb)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 为经球粒隕石标准化的比值; $\delta Ce = 2Ce_N / (La + Pr)_N$, $\delta Eu = 2Eu_N / (Sm + Gd)_N$, 此处的 N 代表经球粒隕石标准化的比值; $Ce_{anom} = \lg[3 \times Ce_n / (2 \times La_n + Nd_n)]$, 此处 Ce_n 、 La_n 和 Nd_n 为经北美页岩标准化后的值。

底部黑色碳质页岩中, 稀土元素总量分布在 $(107.79 \sim 172.61) \times 10^{-6}$ 之间, 均值为 136.21×10^{-6} , $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 均值为 10.01; 中部粉砂质泥岩、钙质粉砂岩中, 稀土元素总量分布在 $(118.23 \sim 168.57) \times 10^{-6}$

之间, 均值为 146.67×10^{-6} , $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 均值为 8.39; 上部泥质粉砂岩中, 稀土元素总量分布在 $(134.18 \sim 155.14) \times 10^{-6}$ 之间, 均值为 146.72×10^{-6} , $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 均值为 7.36。相比较而言, 底部

黑色碳质页岩中尽管稀土元素总量相对较低,但轻、重稀土元素富集程度差异较大,其中在底部层系轻稀土元素较为富集,重稀土元素较为亏损,这是由于黏土矿物对轻稀土元素具有较强的吸附能力^[24],也反映了底部黏土含量较高的特征。

3.2 稀土元素配分模式

稀土元素在地壳中明显呈现偶数元素丰度高于相邻奇数元素的现象,因此需要选定一种参照物(一般以球粒陨石为标准)进行标准化,以便消除样品中的奇偶效应。笔者采用 Boynton 等^[25]提出的球粒陨石标准值,对筇竹寺组样品中稀土元素含量进行标准化处理。从分段特征来看(图 2b~d):筇竹寺组底部、中部和顶部样品中稀土元素配分模式曲线极为相似,尤其是顶部样品曲线形态几乎一致;整体来看(图 2a),筇竹寺组样品稀土元素配分模式曲线较为类似,曲线形态未发生明显变化,表明样品中元素的分布特征类型和沉积物来源一致,可以利用稀土元素特征更进一步判断物源区性质。

由图 2 可见,稀土元素配分曲线统一呈现右倾,表明轻稀土元素富集,重稀土元素严重亏损;反映轻、重稀土元素之间分异的参数 $(La/Yb)_N$ (表 2)在筇竹寺组处在 7.70~12.46 之间,平均为 9.61,表明样品中轻、重稀土元素分异程度大。这种分异现象随着岩性的差异也各有不同。其中,在底部黑色碳质页岩、中部泥质粉砂岩及上部泥质灰岩中参

数 $(La/Yb)_N$ 平均值分别为 11.07、9.35 和 7.94。表明底部碳质页岩中黏土矿物含量高,对轻稀土元素吸附能力更大,造成轻、重稀土元素分异程度大。

La—Eu 段轻稀土元素斜率较大,Gd—Lu 段重稀土元素部分较为平坦,指示轻稀土元素之间分馏程度的 $(La/Sm)_N$ 和重稀土元素之间分馏程度的 $(Gd/Yb)_N$ 在筇竹寺组样品中平均分别为 3.86 和 1.67,表明筇竹寺组样品中轻稀土元素分馏程度高,重稀土元素分馏程度不高。

此外,所有样品在铕元素(Eu)处呈“V”字形,表明 Eu 亏损,呈负异常(δEu 平均为 0.68);同时 Ce 轻微亏损(δCe 平均为 0.92)。

4 稀土元素特征指示的地质意义

稀土元素沉降速率快,化学性质稳定,能保存大量的原始地球化学特征,而在外力的作用下又会发生富集和亏损。一般来说,受成岩作用影响,稀土元素的配分模式会发生变化,造成 Ce 富集、Eu 亏损,削弱 REE 对原始沉积环境的指示意义^[26-27],并导致 δCe 、 δEu 与 REE 呈良好的相关性。

在对研究样品分析后发现(图 3),无论从整体上还是分段来看, δCe 与 REE、 δEu 的相关性均很低,其中整体上 δCe 与 REE 的相关系数约为 0.45,而 δEu 与 δCe 相关系数则为 0.27,说明这三者之间都不具相关特征,反映成岩作用对该组样品的稀土

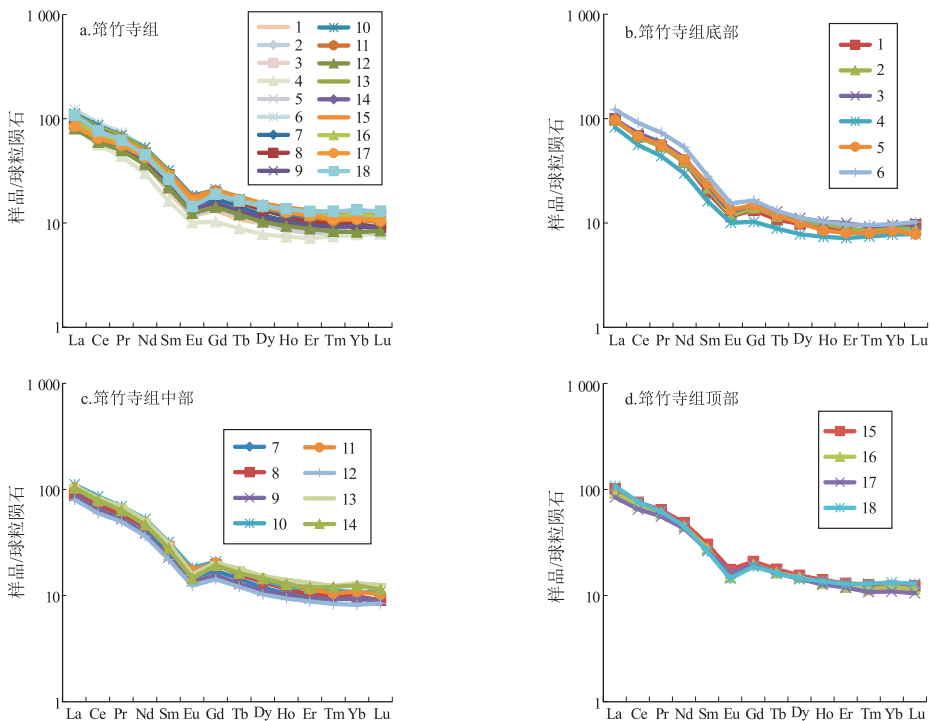


图 2 川东北杨坝剖面筇竹寺组样品稀土元素配分模式

Fig.2 REE distribution in Qiongzhusi Formation, Yangba section, northeastern Sichuan

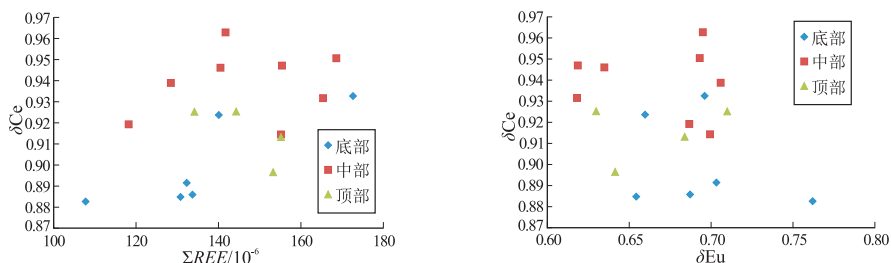


图 3 川东北杨坝剖面筇竹寺组样品中 δCe 与 ΣREE 、 δEu 相关关系

Fig.3 Correlation of δCe vs. ΣREE and δEu of Qiongzhusi Formation, Yangba section, northeastern Sichuan

元素配分基本无影响。因此,本文可以利用稀土元素来指示沉积环境及判断物质来源。

4.1 物质来源分析

前文稀土元素分布特征已经揭示了筇竹寺组从底部到顶部沉积物来源稳定,且存在陆源碎屑的供给。而稀土元素能够快速沉积并赋存在沉积物的碎屑颗粒中,能够很好地保留母岩的地球化学信息,因此常用来定性识别沉积物的来源特征^[28]。

一般认为,澳大利亚太古宇页岩(PAAS)与北美页岩(NASC)中稀土元素的平均含量基本代表了大陆上地壳稀土元素的的平均含量^[29],筇竹寺组样品中稀土元素经球粒陨石标准化后的配分模式曲线呈现出的轻稀土元素富集、重稀土含量稳定和明显负 Eu 异常等特征,与太古宇页岩和北美页岩的变化趋势相似(图 4),因而判断筇竹寺组的沉积物来源于上地壳。

此外,可以利用 La/Yb 与 ΣREE 交会图,通过识别某些岩石的成因特征,以判别沉积物来源及物源区特征^[30]。图 5 显示筇竹寺组样品点集中分布在沉积岩与花岗岩的交会区,因此筇竹寺组的物质来源以沉积岩和花岗岩为主。

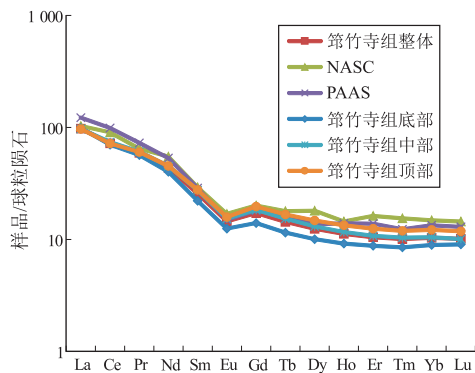


图 4 川东北杨坝剖面筇竹寺组页岩段稀土元素与澳大利亚太古宇页岩(PAAS)及北美页岩(NASC)经球粒陨石标准化后的配分模式

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of Qiongzhusi shale in Yangba section in northeastern Sichuan, compared with NASC and PAAS

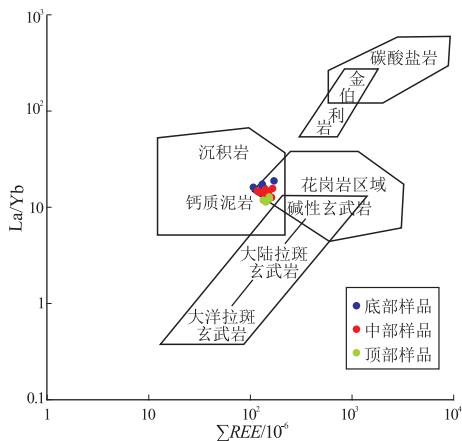


图 5 川东北杨坝剖面筇竹寺组 La/Yb 与 ΣREE 交会图 底图来源于文献[30],有修改。

Fig.5 ΣREE vs. La/Yb of Qiongzhusi Formation, Yangba section, northeastern Sichuan

4.2 物源区构造背景

大地构造背景和构造演化会影响沉积物源的组成,导致稀土元素分布存在差异^[31-32]。利用 La—Th—Sc 三角图可以识别沉积物源的构造背景,研究区筇竹寺组样品投点介于大陆岛弧与大陆边缘构造环境之间(图 6)。根据被动大陆边缘与

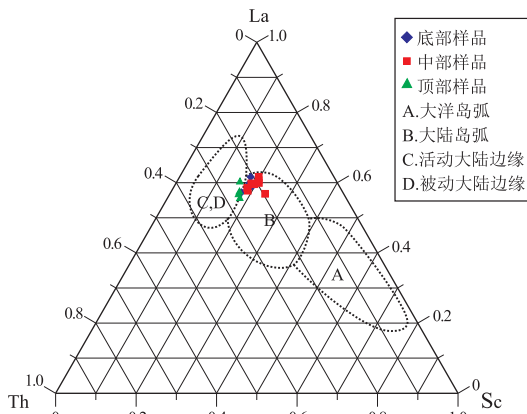


图 6 川东北杨坝剖面筇竹寺组 La—Th—Sc 构造背景判别 底图来源于文献[31],有修改。

Fig.6 Tectonic setting discrimination of La—Th—Sc of Qiongzhusi Formation, Yangba section, northeastern Sichuan

主动大陆边缘构造背景下沉积物中稀土元素特征^[33],研究区筇竹寺组轻稀土元素富集、Eu 亏损(δEu 介于 0.63~0.78 之间,平均为 0.68),与被动大陆边缘构造背景下形成的稀土元素特征类似。上述结果一致说明筇竹寺组沉积在被动大陆边缘构造环境中。

4.3 沉积环境分析

ELDERFIELD H 等^[34]提出在北美页岩稀土元素标准化的基础上,利用 Ce_{anom} ($\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg[3 \times \text{Ce}_n / (2 \times \text{La}_n + \text{Nd}_n)]$) 来指示水体的氧化还原环境。当 $\text{Ce}_{\text{anom}} > -0.10$, 表示 Ce 富集,反映还原环境;反之则表示 Ce 亏损,沉积水体为氧化环境^[35]。根据该公式计算得到的筇竹寺组岩样中 Ce_{anom} 普遍大于 -0.10 (表 2)。除此之外,还可以利用元素 Ce 在不同氧化条件下的价态变化来指示水体的氧化还原环境^[25,36]。一般说来,在还原环境中 Ce 多以 Ce^{3+} 的形式存在,在氧化环境中则易被氧化为 Ce^{4+} 。因此反映这种价态变化的 δCe 小于 1 时,反映 Ce 负异常,水体处于缺氧的环境中;而当 $\delta\text{Ce} > 1$ 时,反映 Ce 正异常。筇竹寺组岩样经过球粒陨石标准化后,计算得到的 δCe 结果为 0.88~0.96,平均为 0.92 (表 2)。总体说明,无论是 Ce_{anom} 还是 δCe ,均指示筇竹寺组整体上发育在水体缺氧的环境中。

为了进一步弄清筇竹寺组从底部到顶部的差异,笔者利用对氧化条件较为敏感的微量元素 V 和 Cr^[37],根据其比值来深入探讨筇竹寺组从底部至顶部沉积时期环境的变化(图 7)。筇竹寺组从底部到顶部,V/Cr 与 δCe 均略有差异(表 2)。其中,底部 V/Cr 普遍较高,在 2.3~8.8 之间,平均为

4.6,指示厌氧环境;中部 V/Cr 处于 1.82~5.0 之间,平均为 2.8,属于贫氧环境;至顶部 V/Cr 处于 2.0~3.0 之间,平均为 2.4,同样属于贫氧环境。而从 δCe 来看,底部的值偏低,处于 0.88~0.93 之间,平均为 0.90;至中上部 δCe 有所偏高,平均值分别为 0.94 和 0.92,较之底部含氧量有所增加,还原性降低。这一特征正好与早寒武世沉积时海平面由深到浅的变化相对应^[38],同时也与筇竹寺组底部有机质丰度高,而中上部 TOC 含量很低的变化趋势相一致。

5 结论与讨论

(1) 稀土元素分布特征显示:筇竹寺组总体上具有 ΣREE 高、轻稀土富集、重稀土元素亏损的特征;由于岩性的差异,研究区筇竹寺组从底部到顶部,轻、重稀土元素富集程度、分异程度存在差异,尤其是底部碳质页岩中黏土矿物含量高,轻、重稀土元素分异程度最大,更加富集轻稀土元素。

(2) 球粒陨石标准化后的 REE 配分模式图在筇竹寺组整体上呈左侧倾斜、右侧宽缓,同时呈现 Eu 负异常及 Ce 无异常的特征,从底部到顶部层位样品中配分模式基本一致,反映了筇竹寺组整体上沉积物母质来源一致。

(3) 稀土元素 La/Yb 与 ΣREE 交会图及 Eu 负异常特征揭示,筇竹寺组沉积物源来自以被动大陆边缘为构造背景的地区,其中母岩类型为沉积岩和花岗岩的混合;反映沉积水体介质氧化还原条件的 δCe 与 V/Cr 参数指示筇竹寺组整体发育在缺氧的还原环境中,其中底部碳质页岩发育时沉积水介质呈厌氧的环境,中部—上部地层沉积时含氧量有所增加,属于贫氧—微弱氧化的环境。

(4) 筇竹寺组整体沉积物源形成背景相似,岩性差异不大,但由于在后期沉积过程中水体介质的差异,导致筇竹寺组从底部到顶部有机质丰度差异较大,反映了不同水介质环境对沉积物中有机质的保存作用差异较大。因此,在沉积物源相似的情况下,沉积物的沉积环境是影响其烃源岩质量的关键因素。

参考文献:

- [1] 陈建平,梁狄刚,张水昌,等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1132-1142. CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1132-1142.

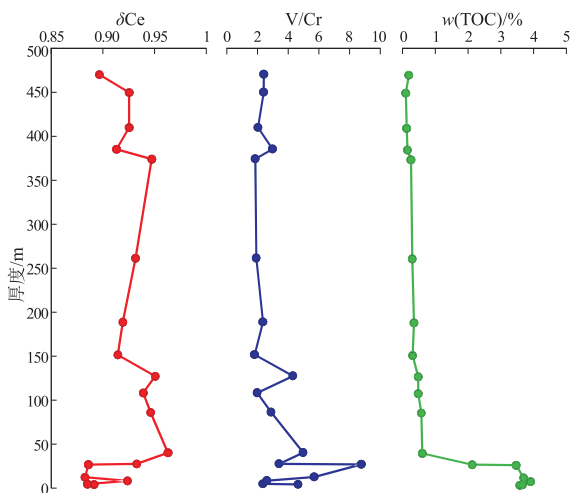


图7 川东北杨坝剖面筇竹寺组 δCe 、V/Cr 和 TOC 含量纵向变化

Fig.7 Vertical variation of δCe , V/Cr and TOC content of Qiongzhusi Formation, Yangba section, northeastern Sichuan

- [2] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653. ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [3] 李建忠,董大忠,陈更生,等.中国页岩气资源前景与战略地位[J].天然气工业,2009,29(5):11-16. LI Jianzhong, DONG Dazhong, CHEN Gengsheng, et al. Prospects and strategic position of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 11-16.
- [4] 任东超,陈义才,孙超亚,等.威远地区筇竹寺组页岩气成藏条件分析[J].石油化工应用,2016,35(8):99-103. REN Dongchao, CHEN Yicai, SUN Chaoya, et al. Shale gas reservoir-forming conditions and predicting favorable exploration area in Qiongzhusi Formation, Vying region [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(8): 99-103.
- [5] 王同,熊亮,徐猛,等.川南地区下寒武统筇竹寺组页岩储层特征[J].石油实验地质,2016,38(2):197-203. WANG Tong, XIONG Liang, XU Meng, et al. Shale reservoir characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(2): 197-203.
- [6] 李琪琪,李斌,刘羿伶,等.川西北古生界烃源岩特征及生烃潜力评价[J].特种油气藏,2018,25(3):44-49. LI Qiqi, LI Bin, LIU Yiling, et al. Paleozoic source-rock properties and hydrocarbon generation potential in Northwest Sichuan [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 44-49.
- [7] 史洪亮,王同,陈霞,等.川南上古生界高演化页岩成熟度指标[J].断块油气田,2018,25(1):43-47. SHI Hongliang, WANG Tong, CHEN Xia, et al. Research on thermal maturity indicators of Lower Palaeozoic over-mature shale in southern Sichuan area [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 43-47.
- [8] 黄金亮,邹才能,李建忠,等.川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J].石油勘探与开发,2012,39(1):69-75. HUANG Jinliang, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75.
- [9] 闫德宇,黄文辉,王婷灏,等.中、下扬子地区下寒武统黑色页岩微量元素富集特征[J].地学前缘,2016,23(3):41-50. YAN Deyu, HUANG Wenhui, WANG Tinghao, et al. Trace element characteristics of the Lower Cambrian black shales in middle and lower Yangtze area, China [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 41-50.
- [10] 程克明,王世谦,董大忠,等.上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J].天然气工业,2009,29(5):40-44. CHENG Keming, WANG Shiqian, DONG Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Upper Yangtze region [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 40-44.
- [11] 刘本立.地球化学基础[M].北京:北京大学出版社,1994. LIU Benli. Foundation of geochemistry [M]. Beijing: Peking University Press, 1994.
- [12] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [13] 朱志军,陈洪德,林良彪,等.川东南—湘西地区志留系小河坝组砂岩微量元素地球化学特征及意义[J].地质科技情报,2010,29(2):24-30. ZHU Zhijun, CHEN Hongde, LIN Liangbiao, et al. Signification and characteristic of the trace element ratios of the sandstone in Silurian Xiaoheba Formation in southeastern Sichuan Province and western Hunan Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(2): 24-30.
- [14] 万友利,王剑,万方,等.羌塘盆地南部古油藏带布曲组碳酸盐岩稀土元素特征及意义[J].石油实验地质,2017,39(5):655-665. WAN Youli, WANG Jian, WAN Fang, et al. Characteristics and indications of rare earth elements in carbonates in the Buqu Formation, southern Qiangtang Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(5): 655-665.
- [15] 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.
- [16] 梁世友,陈迎宾,赵国伟,等.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[J].石油实验地质,2017,39(1):94-98. LIANG Shiyu, CHEN Yingbin, ZHAO Guowei, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements and their geological significance in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 94-98.
- [17] 赵立鹏,王冉,钟方军,等.赣东北重点泥页岩层系地球化学特征分析[J].特种油气藏,2017,24(1):64-69. ZHAO Lipeng, WANG Ran, ZHONG Fangjun, et al. Geochemistry features of key mud shale formations in Northeast Jiangxi Province [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(1): 64-69.
- [18] 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 and Gas Field, 2013, 20(2): 157-161.
- [19] 龙胜祥,郭彤楼,刘彬,等.通江—南江—巴中构造河坝飞仙关组三段、嘉陵江组二段气藏形成特征研究[J].地质学报,2008,82(3):338-345. LONG Shengxiang, GUO Tonglou, LIU Bin, et al. Gas-pool charac-

- teristics of the second section of the Jialingjiang Formation and the third section of the Feixianguan Formation in the Heba area of Tongjiang-Nanjiang-Bazhong Structure Belt, North Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(3): 338-345.
- [20] 李伟,余华琪,邓鸿斌.四川盆地中南部寒武系地层划分对比与沉积演化特征[J].石油勘探与开发,2012,39(6):681-690. LI Wei, YU Huaqi, DENG Hongbin. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central-southern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 681-690.
- [21] 李皎,何登发.四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造—沉积环境演化[J].古地理学报,2014,16(4):441-460. LI Jiao, HE Dengfa. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Cambrian in Sichuan Basin and adjacent areas [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(4): 441-460.
- [22] 赵来时,吴元保,胡兆初,等.牙形石微量元素对生物绝灭事件的响应:以二叠—三叠系全球层型剖面第一幕绝灭事件为例[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(5):725-732. ZHAO Laishi, WU Yuanbao, HU Zhaochu, et al. Trace element compositions in Conodont phosphates responses to biotic extinction event; a case study for main act of global boundary stratotype section and point of the Permian-Triassic [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2009, 34(5): 725-732.
- [23] 亨德森.稀土元素地球化学[M].田丰,施琅.译.北京:地质出版社,1989:201-203. HENDERSON P. Rare earth element geochemistry [M]. TIAN Feng, SHI Lang, trans. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 201-203.
- [24] 刘锐娥,卫孝峰,王亚丽,等.泥质岩稀土元素地球化学特征在物源分析中的意义:以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J].天然气地球科学,2005,16(6):788-791. LIU Ruie, WEI Xiaofeng, WANG Yali. The geochemical characteristics of rare earth elements of the shale rock in the geologic signification of the analysis of the sedimentary provenance: an example in the Upper Palaeozoic in the Ordos Basin [J]. *Nature Gas Geoscience*, 2005, 16(6): 788-791.
- [25] BOYNTON W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [M] // HENDERSON P. Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [26] SHIELDS G, STILLE P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites [J]. *Chemical Geology*, 2001, 175(1/2): 29-48.
- [27] 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 and Gas Field*, 2013, 20(2): 157-161.
- [28] MURRAY R W, BUCHHOLTZ TEN BRINK M R, JONES D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18(3): 268-271.
- [29] 王克兵,孟庆涛,刘招君,等.柴北缘鱼卡地区中侏罗统石门沟组页岩段稀土元素地球化学特征与地质意义[J].世界地质,2017,36(3):862-870. WANG Keping, MENG Qingtao, LIU Zhaojun, et al. Rare earth element geochemical characteristics and geological significance of shale member in Middle Jurassic Shimengou Formation in Yuzia area of northern margin of Qaidam Basin [J]. *Global Geology*, 2017, 36(3): 862-870.
- [30] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust, its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford, London: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- [31] GIRTY G H, HANSON A G, KNAACK C, et al. Provenance determined by REE, Th, and Sc analyses of metasedimentary rocks, Boyden cave roof pendant, Central Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64(1): 68-73.
- [32] BHATIA M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97-113.
- [33] 赵振华. 锕地球化学特征的控制因素 [J]. 南京大学学报(地球科学版), 1993, 5(3): 271-280. ZHAO Zhenhua. The controlling factor of Eu geochemical characteristics [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1993, 5(3): 271-280.
- [34] ELDERFIELD H, GREAVES M J. The rare earth elements in seawater [J]. *Nature*, 1982, 296(5854): 214-219.
- [35] 赵振华. 微量元素地球化学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. ZHAO Zhenhua. The geochemical principle of trace element [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [36] 陈兰. 湘黔地区早寒武世黑色岩系沉积学及地球化学研究 [D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2006: 2-89. CHEN Lan. The Hunan Guizhou area, the Early Cambrian black rock series in sedimentology and geochemistry [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006: 2-89.
- [37] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [38] 张满郎, 谢增业, 李熙酷, 等. 四川盆地寒武纪岩相古地理特征 [J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 128-139. ZHANG Manlang, XIE Zengye, LI Xizhe, et al. Characteristics of lithofacies paleogeography of Cambrian in Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 128-139.