

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2017.02.014

渝东南地区石牛栏组稀土元素 地球化学特征及地质意义

王杰¹, 谭先锋^{1,2}, 陈浩³, 陈青^{1,2},
冉天¹, 王佳^{1,2}, 蒋威¹

(1. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331;

2. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331;

3. 重庆市地勘局 208 水文地质工程地质队, 重庆 400700)

摘要: 渝东南地区的下志留统石牛栏组作为重要的油气储集层, 研究其古环境变化、物质来源及物源区构造背景具有重要意义。本文采用稀土元素总量 $w(\Sigma\text{REE})$ 、REE 配分模式、以及 $w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 、 $w(\text{Ce})_N/w(\text{Yb})_N$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$ 、 $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$ 、 δEu 、 δCe 、 Ce_{anom} 等特征值研究方法, 对渝东南下志留统石牛栏组典型剖面的稀土元素特征及古海洋环境和物源进行深入研究。结果表明: 石牛栏组灰岩稀土元素总量略低于大陆地壳平均值, 轻稀土较为富集, 重稀土亏损, 铈明显负异常, 铈负异常较微弱。 $w(\Sigma\text{REE})$ 证实了石牛栏组的沉积水体由浅缓慢变深再急剧变浅的变化过程。Eu 负异常、Ce 负异常和 Ce_{anom} 值均揭示石牛栏组沉积时期海水具有弱还原性。REE 的分异程度反映了石牛栏组从沉积早期到沉积晚期, 沉积速率总体降低。稀土元素的比值特征及 $w(\Sigma\text{REE})-w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 图解表明其物源源自雪峰山隆起, 源岩主要为沉积岩。

关键词: 油气储集层; 下志留统石牛栏组; 稀土元素; 地球化学特征; 渝东南地区

中图分类号: P618.7; TE121.3 **文献标识码:** A

0 引言

沉积物在沉积过程中与流体介质之间存在着繁杂的地球化学平衡关系, 主要包括吸附元素与元素互换等, 这些关系不但受元素自身性质的影响, 而且与原始沉积流体的物化环境存在一定的联系^[1]。原始沉积物中某些特征元素及其含量差异指示古海洋的沉积水体、沉积速率及氧化还原等环境和古气候^[2-3]。其中, 稀土元素保留了丰富的原始沉积信

息, 可以作为一种重要的示踪手段; 沉积物中某些具有指示意义的微量元素主要受物源影响, 沉积环境和沉积后成岩作用的影响十分有限, 它们为沉积区与物源对比提供了理论依据^[3]。在陆源碎屑岩中稀土元素有较好稳定性, 对物源区的构造背景判别有着重要指示意义^[4]。近年来, 细粒沉积物中某些特征稀土元素已广泛应用于沉积古环境分析、沉积物的物源及沉积物源区的构造背景判定^[2,5-8], 具有重要的环境指示意义。

志留世时期, 受华夏板块和扬子板块相互碰撞影响, 扬子板块沉积了一套以碎屑岩为主的海相地

收稿日期: 2016-10-24; **改回日期:** 2017-03-27; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:41202043)、重庆市基础科学与前沿技术研究项目(编号: cstc2016jcyjA0234)、重庆市教委科学技术研究项目(编号: KJ1401316)和重庆科技学院校内基金(编号: CK2014B12、CK2015Z25)联合资助。

作者简介: 王杰(1994—), 男, 学士, 从事沉积地球化学方面的研究工作。通信地址: 重庆市沙坪坝区虎溪大学城, 重庆科技学院石油与天然气工程学院; 邮政编码: 401331; E-mail: 1060404419@qq.com

通信作者: 陈浩(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事沉积地球化学方面研究工作。通信地址: 重庆市北碚区天生劳动村 10 号, 重庆市地勘局 208 水文地质工程地质队; 邮政编码: 400700; E-mail: 317993709@qq.com

层^[9],其中龙马溪组是渝东南地区页岩气开发的目标层位,石牛栏组是重要的常规油气储集体,两者分别为常规油气的生油层和储集层^[10-11]。近来,已在贵州正安一带发现了宝塔组、龙马溪组、石牛栏组及栖霞组四个高产海相致密天然气层系,其中石牛栏组是油气新层系,每日可获得超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的稳定天然气产量,故对作为常规油气储集层和非常规油气产层的石牛栏组的研究具有重要意义。

本文在前人研究基础上^[1,12-14],以渝东南地区万盛机枪台和黔西北桐梓地区吼滩两条剖面为主要研究对象,全面剖析研究区下志留统石牛栏组的稀土元素特征,并深入研究其沉积水体、氧化还原性、沉积速率的变化及物质来源,力图为该地区志留系古环境研究和油气地质勘探工作提供帮助。

1 地质背景

研究区位于重庆万盛—贵州习水地区(图 1),其大地构造背景为中上扬子地台区,受加里东运动影响,自早寒武世到志留纪早期一直处于稳定下沉状态,为浅海陆棚沉积环境^[1,11]。在四川南部和贵州北部地区,下志留统石牛栏组较为发育,是重要的常规油气储集体。

渝东南地区下志留统石牛栏组在重庆万盛—贵州习水地区,以万盛机枪台剖面和习水吼滩剖面为代表,地层岩性方面主要为页岩和灰岩,且自下而上可分为四个岩性段。一、三段基本为灰质泥岩和灰质粉砂岩互层,间或夹有泥质灰岩;二、四段基本为生物礁灰岩,其间夹有少量生物灰岩,顶部基本为泥质灰岩及泥晶灰岩互层^[11-12]。上述岩性方面反映,石牛栏组沉积时期的古海平面由渐缓升高转变为快

速降低,第一段为混积浅水陆棚沉积,第二段为台地斜坡沉积,第三段为混积深水陆棚沉积,第四段为混积浅水陆棚或礁、滩沉积;其沉积特征主要受海平面变化、物质来源、生物礁发育程度和沉积水体的影响^[11-12]。

2 样品采集处理与分析测试结果

2.1 样品采集与测试

(1) 样品采集处理

本次研究共采集渝东南部下古生界石牛栏组中的各类灰岩新鲜样品 29 件。其中,重庆机枪台剖面的样品(GJq 编号样品)11 件,分布于石牛栏组三、四段;贵州吼滩剖面的样品(HT 编号样品)18 件,分布于石牛栏组整套地层中(图 2)。

样品处理在核工业地质实验室完成。样品的处



图 1 研究区剖面位置

Fig. 1 The location sections of the study area

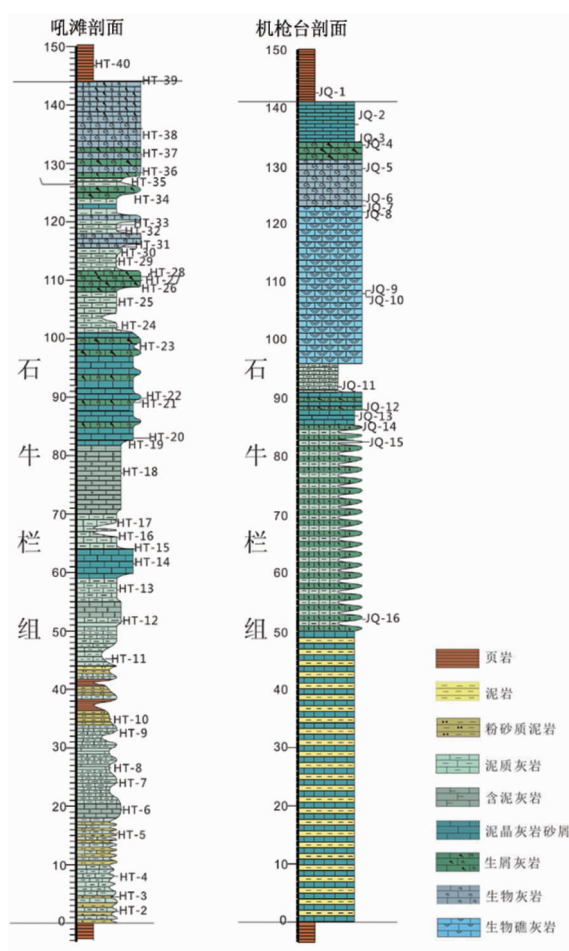


图 2 研究区的位置及取样位置图

(据谭先锋 2014 年资料改编)

Fig. 2 The sampling sections of the study area

理步骤为:准确称量已磨好的新鲜样品 50 mg 放入 25 ml 专用溶样罐中,先用少许纯净水润湿,轻轻震动专用溶样罐使样品与水混合均匀,加入已量取好的 1 ml 氢氟酸,3 ml 硝酸,1 ml 高氯酸,盖上罐盖,在低温电热板上进行 200 ℃ 的加热溶解,待样品完全分解后,打开专用溶样罐,在低温电热板上加热蒸干,然后滴加两滴高氯酸,再次蒸干后加入 1:1 硝酸 3 ml 盖上溶样罐盖焖置一段时间。用已备好的 1%硝酸提取到 50 ml 容量瓶中,摇匀后待用。

(2)分析测试方法

样品测试在核工业地质实验室完成。采用 ICP-MS 在线内标(Rh)法进行稀土元素及微量元素含量测试,误差小于 5%。

2.2 样品测试结果

本次研究所采集的石牛栏组 29 件各类灰岩新鲜样品的稀土元素含量测试结果见表 1 所示,稀土元素及微量元素 V、Ni 地球化学特征值见表 2 所述。

3 稀土元素地球化学特征

3.1 稀土元素总量特征

在沉积岩中,稀土元素含量上的差异受沉积过程中各种元素相互交换、反应和物源区的物理化学风化、搬运作用的影响较大^[13-15]。渝东南地区石牛栏组灰岩样品的稀土元素总量特征(表 2)显示,重庆万盛机枪台、贵州习水吼滩两地区稀土元素的总量($w(\Sigma\text{REE})$)变化较大,其中万盛机枪台剖面该值介于 $30.29 \times 10^{-6} \sim 202.32 \times 10^{-6}$ 之间,平均 $w(\Sigma\text{REE})=86.17 \times 10^{-6}$;习水吼滩剖面该值的范围为 $14.36 \times 10^{-6} \sim 208.96 \times 10^{-6}$,平均 $w(\Sigma\text{REE})=93.87 \times 10^{-6}$ 。总体上,研究区石牛栏组灰岩样品稀土元素 $w(\Sigma\text{REE})$ 显著低于北美页岩 (173.21×10^{-6}) 和大陆上地壳 (146.4×10^{-6}),说明碳酸盐类矿物能够稀释稀土元素。

表 1 渝东南地区下志留统石牛栏组灰岩稀土元素含量

Table 1 REE contents of limestone in Silurian Shiniulan Formation, Southeastern Chongqing Areas

样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
GJq-2	砂屑、粉屑灰岩	11.3	20.9	2.51	9.58	1.71	0.344	1.48	0.279	1.46	0.269	0.8	0.129	0.84	0.127
GJq-3	粉屑灰岩	6.71	12	1.44	5.46	1.01	0.183	0.888	0.168	0.93	0.175	0.544	0.091	0.60	0.092
GJq-4	生屑、砂屑灰岩	15.2	28.8	3.56	13.8	2.71	0.541	2.3	0.448	2.43	0.443	1.32	0.215	1.42	0.212
GJq-5	生物灰岩	14.9	28	3.58	13.9	2.73	0.513	2.28	0.452	2.43	0.445	1.32	0.217	1.42	0.21
GJq-7	生物灰岩	6.72	12.6	1.64	6.78	1.38	0.329	1.23	0.242	1.31	0.238	0.657	0.097	0.59	0.086
GJq-8	生物礁灰岩	8.34	15.8	1.99	7.89	1.52	0.286	1.32	0.262	1.42	0.261	0.758	0.121	0.77	0.112
GJq-9	生物礁灰岩	11.8	22.5	2.86	11.3	2.09	0.374	1.77	0.338	1.75	0.32	0.959	0.154	1	0.151
GJq-11	泥质灰岩	45.1	82.1	9.87	36.8	6.77	1.13	5.78	1.06	5.43	0.989	3.05	0.495	3.25	0.498
GJq-13	粉屑、砂屑灰岩	25.2	49.1	6.09	23.6	4.72	0.966	4.12	0.807	4.45	0.827	2.43	0.387	2.5	0.367
GJq-14	砂屑、生屑灰岩	25.3	49.4	6.29	24.4	4.79	0.915	4.09	0.8	4.33	0.798	2.37	0.387	2.5	0.373
GJq-16	砂屑、生屑灰岩	27.7	52.1	6.64	25.5	4.92	0.917	4.13	0.805	4.23	0.781	2.35	0.377	2.45	0.374
HT-2	泥质灰岩	16.1	29	4.02	16.8	3.34	0.619	2.73	0.542	2.91	0.537	1.6	0.254	1.66	0.246
HT-5	泥质灰岩	16.5	30.1	3.93	15.6	2.97	0.552	2.49	0.492	2.63	0.482	1.44	0.229	1.48	0.222
HT-7	泥质灰岩	15.9	28.7	3.81	14.8	2.78	0.526	2.42	0.471	2.58	0.481	1.43	0.231	1.52	0.222
HT-10	灰质泥岩	26.9	42.5	5.59	21.5	3.96	0.732	3.48	0.67	3.59	0.656	1.99	0.325	2.11	0.316
HT-13	泥质灰岩	19.3	34.4	4.28	16.9	3.2	0.601	2.75	0.537	2.9	0.547	1.65	0.274	1.79	0.266
HT-18	泥质灰岩	16.4	30	3.66	13.8	2.51	0.455	2.23	0.425	2.25	0.417	1.26	0.206	1.34	0.2
HT-19	泥质灰岩	19.5	35.7	4.41	17.1	3.31	0.595	2.88	0.551	2.96	0.555	1.69	0.278	1.81	0.279
HT-22	生物碎屑灰岩	27.9	52.4	6.26	23.8	4.35	0.629	3.76	0.676	3.36	0.607	1.92	0.316	2.14	0.332
HT-24	泥质灰岩	19.1	32.2	3.86	14.4	2.6	0.492	2.3	0.434	2.26	0.422	1.29	0.214	1.4	0.209
HT-26	生屑灰岩	5.93	11	1.27	4.98	0.969	0.179	0.872	0.172	0.95	0.18	0.537	0.089	0.59	0.091
HT-28	生屑灰岩	21.4	39.9	4.84	18.8	3.55	0.64	3.03	0.585	3.17	0.587	1.79	0.298	1.98	0.303
HT-29	泥质灰岩	31.3	56.9	6.9	26.2	5.11	0.882	4.36	0.821	4.29	0.778	2.37	0.385	2.56	0.39
HT-30	泥质灰岩	9.73	17	2.03	7.59	1.38	0.263	1.23	0.234	1.28	0.243	0.759	0.13	0.86	0.133
HT-31	生物灰岩	26.2	45.4	5.16	19	3.4	0.556	2.99	0.544	2.83	0.528	1.68	0.282	1.91	0.297
HT-33	泥质灰岩	13.6	29.5	3.95	16.3	3.26	0.727	2.71	0.544	2.93	0.526	1.52	0.238	1.52	0.222
HT-34	生屑灰岩	47.6	85.6	10.3	37.6	6.81	0.992	5.88	1.05	5.12	0.927	2.94	0.475	3.18	0.487
HT-37	砂屑、生屑灰岩	3.16	5.37	0.70	2.73	0.513	0.099	0.451	0.089	0.49	0.091	0.273	0.046	0.30	0.046
HT-39	砾屑、生屑灰岩	6.52	12.6	1.97	8.37	1.98	0.436	1.68	0.365	2.14	0.389	1.08	0.171	1.07	0.152

量单位: $w_B/10^{-6}$

表 2 渝东南地区下志留统石牛栏组灰岩稀土元素及微量元素地球化学特征

Table 2 REE geochemical characteristics of limestone in Silurian Shiniulan Formation, Southeastern Chongqing

样号	$w(\Sigma\text{REE})$	$w(\Sigma\text{L})$	$w(\Sigma\text{H})$	$w(\Sigma\text{L})/w(\Sigma\text{H})$	$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$	$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	$w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	$w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	δCe	δEu	$w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$	$w(\text{La})_{\text{n}}/w(\text{Yb})_{\text{n}}$	Ce_{anom}	$w(\Sigma\text{REE})_{\text{n}}$	$\delta(\text{Ce})_{\text{n}}$	$\delta(\text{Eu})_{\text{n}}$
GJq-2	51.73	46.34	5.39	8.60	4.16	9.05	6.42	1.42	0.91	0.65	0.43	1.30	-0.06	3.98	0.85	0.95
GJq-3	30.29	26.80	3.49	7.69	4.18	7.58	5.20	1.20	0.89	0.58	0.71	1.09	-0.07	2.47	0.84	0.85
GJq-4	73.40	64.61	8.79	7.35	3.53	7.22	5.25	1.31	0.91	0.65	0.60	1.04	-0.06	6.18	0.85	0.95
GJq-5	72.40	63.62	8.77	7.25	3.43	7.07	5.1	1.30	0.90	0.61	0.71	1.02	-0.07	6.15	0.84	0.9
GJq-7	33.9	29.45	4.45	6.62	3.06	7.67	5.51	1.68	0.89	0.76	0.71	1.10	-0.08	3.04	0.83	1.11
GJq-8	40.85	35.83	5.02	7.13	3.45	7.30	5.31	1.38	0.90	0.60	0.53	1.05	-0.07	3.47	0.84	0.89
GJq-9	57.37	50.92	6.44	7.90	3.55	7.96	5.82	1.43	0.91	0.58	0.62	1.14	-0.07	4.62	0.84	0.85
GJq-11	202.32	181.77	20.55	8.84	4.19	9.36	6.53	1.44	0.90	0.54	0.71	1.34	-0.07	15.25	0.85	0.79
GJq-13	125.56	109.68	15.89	6.90	3.36	6.80	5.08	1.33	0.93	0.66	0.27	0.98	-0.05	10.92	0.86	0.96
GJq-14	126.74	111.1	15.65	7.10	3.32	6.82	5.11	1.32	0.92	0.62	0.70	0.98	-0.06	10.88	0.85	0.91
GJq-16	133.27	117.78	15.5	7.60	3.54	7.62	5.5	1.36	0.90	0.61	0.71	1.10	-0.07	11.03	0.84	0.89
HT-2	80.36	69.88	10.48	6.67	3.03	6.54	4.52	1.33	0.85	0.61	0.72	0.94	-0.1	7.21	0.79	0.9
HT-5	79.12	69.65	9.47	7.36	3.49	7.52	5.26	1.36	0.87	0.60	0.75	1.08	-0.08	6.66	0.81	0.89
HT-7	75.87	66.52	9.36	7.11	3.58	7.05	4.88	1.28	0.86	0.61	0.72	1.01	-0.09	6.49	0.8	0.89
HT-10	114.32	101.18	13.14	7.70	4.27	8.60	5.21	1.33	0.79	0.59	0.73	1.24	-0.13	9.35	0.75	0.87
HT-13	89.40	78.68	10.71	7.34	3.79	7.27	4.97	1.24	0.87	0.61	0.72	1.04	-0.08	7.53	0.82	0.89
HT-18	75.15	66.83	8.33	8.02	4.11	8.25	5.79	1.34	0.90	0.58	0.66	1.19	-0.07	5.96	0.84	0.84
HT-19	91.62	80.62	11.00	7.33	3.71	7.26	5.1	1.28	0.89	0.58	0.76	1.04	-0.07	7.7	0.84	0.85
HT-22	128.45	115.34	13.11	8.80	4.03	8.79	6.33	1.42	0.92	0.46	0.80	1.26	-0.06	9.63	0.86	0.68
HT-24	81.18	72.65	8.53	8.52	4.62	9.20	5.95	1.33	0.85	0.60	0.69	1.32	-0.09	6.26	0.82	0.88
HT-26	27.81	24.33	3.48	6.99	3.85	6.82	4.86	1.20	0.92	0.58	0.35	0.98	-0.06	2.38	0.87	0.85
HT-28	100.87	89.13	11.74	7.59	3.79	7.29	5.21	1.23	0.91	0.58	0.72	1.05	-0.07	8.31	0.85	0.86
HT-29	143.25	127.29	15.95	7.98	3.85	8.24	5.75	1.37	0.89	0.56	0.71	1.18	-0.07	11.43	0.84	0.82
HT-30	42.86	37.99	4.87	7.80	4.44	7.63	5.11	1.15	0.88	0.61	0.70	1.10	-0.08	3.48	0.83	0.89
HT-31	110.78	99.72	11.06	9.02	4.85	9.25	6.15	1.26	0.89	0.52	0.72	1.33	-0.07	8.22	0.85	0.77
HT-33	77.55	67.34	10.21	6.60	2.62	6.03	5.02	1.44	0.96	0.73	0.67	0.87	-0.04	7.03	0.88	1.07
HT-34	208.96	188.9	20.06	9.42	4.40	10.09	6.96	1.49	0.89	0.47	0.71	1.45	-0.07	15.09	0.84	0.69
HT-37	14.36	12.57	1.78	7.06	3.87	7.17	4.68	1.23	0.83	0.62	0.71	1.03	-0.1	1.24	0.79	0.9
HT-39	38.92	31.88	7.05	4.52	2.07	4.11	3.05	1.27	0.84	0.71	0.73	0.59	-0.11	4.4	0.77	1.05

量单位: $w_{\text{B}}/10^{-6}$ 。下标 N 表示元素相对球粒陨石标准化值,下标 n 为北美页岩组合样标准化值。 $w(\Sigma\text{L})=w(\Sigma\text{LREE})$; $w(\Sigma\text{H})=w(\Sigma\text{HREE})$; $w(\Sigma\text{L})/w(\Sigma\text{H})=w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})$; $\delta\text{Eu}=w(\text{Eu})_{\text{N}}/[w(\text{Sm})_{\text{N}}\times w(\text{Gd})_{\text{N}}]^{1/2}$; $\delta\text{Ce}=w(\text{Ce})_{\text{N}}/[w(\text{La})_{\text{N}}\times w(\text{Pr})_{\text{N}}]^{1/2}$; $\text{Ce}_{\text{anom}}=\lg[3w(\text{Ce})_{\text{N}}/[2w(\text{La})_{\text{n}}+w(\text{Nd})_{\text{n}}]]$; $w(\Sigma\text{REE})_{\text{n}}=w(\text{La})_{\text{n}}+w(\text{Ce})_{\text{n}}+w(\text{Pr})_{\text{n}}+w(\text{Nd})_{\text{n}}+w(\text{Sm})_{\text{n}}+w(\text{Eu})_{\text{n}}+w(\text{Gd})_{\text{n}}+w(\text{Tb})_{\text{n}}+w(\text{Dy})_{\text{n}}+w(\text{Ho})_{\text{n}}+w(\text{Er})_{\text{n}}+w(\text{Tm})_{\text{n}}+w(\text{Yb})_{\text{n}}+w(\text{Lu})_{\text{n}}$; $\delta(\text{Eu})_{\text{n}}=w(\text{Eu})_{\text{n}}/[w(\text{Sm})_{\text{n}}\times w(\text{Gd})_{\text{n}}]^{1/2}$; $\delta(\text{Ce})_{\text{n}}=w(\text{Ce})_{\text{n}}/[w(\text{La})_{\text{n}}\times w(\text{Pr})_{\text{n}}]^{1/2}$

3.2 稀土元素比值特征

稀土元素的 $w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})$ 值能够较好显示样品的轻、重稀土的分异程度。在相同类型的岩石中,该数值越大或越小,说明轻稀土越富集或亏损,分异越明显,数值越接近于 1,分异越弱^[2,9,16]。从表 2 可知,万盛机枪台剖面样品的 $w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})$ 值介于 6.26~8.84 之间,平均 $w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})=7.55$;习水吼滩剖面样品的 $w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})$ 为 4.52~12.13,平均值为 7.78。总体上,两个剖面样品的平均 $w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})$ 值均略高于北美页岩(7.44),说明研究区石牛栏组灰岩轻稀土较富集,重稀土相对亏损。

稀土元素的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值是稀土元素相对于球粒陨石标准化所得图解中分布曲线的斜率^[9],该值越大,曲线倾斜越厉害,轻/重稀土元素分异越强。从表 2 可以看出,万盛机枪台剖面样品的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值范围为 6.8~9.36,其平均为 7.67;习水吼滩剖面样品的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值范围为 4.11~14.75,平均值为 8.16。万盛机枪台剖面样品的 $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在 5.08~6.53 之间,平均为 5.53;习水吼滩剖面样品的 $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在 3.05~10.4 之间,平均值为 5.68。上述两个剖面灰岩的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值均说明,研究区石牛栏组轻/重稀土元素分异程度较强。

稀土元素的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值的大小可以代表轻稀土的分馏强弱,该值越小,表明轻稀土相对亏损; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值的大小可以代表重稀土的分馏强弱,该值越大,重稀土越亏损^[17]。从表 2 中不难看出,万盛机枪台剖面灰岩样品的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值介于 3.06~4.19 之间,平均为 3.62; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值介于 1.2~1.68 之间,平均 1.38。习水吼滩剖面灰岩样品 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值范围为 2.07~4.85,其平均值为 3.81; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值介于 1.15~1.94 之间,平均值为 1.41。其特征值表明上述两个剖面灰岩样品的轻稀土之间分馏中等,重稀土之间分馏弱。

3.3 Eu 和 Ce 异常特征

(1) δEu 与 $\delta(\text{Eu})_{\text{N}}$

研究区石牛栏组灰岩的 Eu(相对球粒陨石标准化值)有明显的负异常($\delta\text{Eu} < 1$)。在表 2 中,万盛机枪台剖面样品的 δEu 的值介于 0.54~0.76 之间,平均值为 0.62;习水吼滩剖面样品 δEu 值介于 0.46~0.73 之间,平均为 0.59。石牛栏组机枪台和吼滩两剖面灰岩样品的 δEu 平均值与北美页岩($\delta\text{Eu} = 0.65$)较为接近。

而研究区石牛栏组灰岩的 $\delta(\text{Eu})_{\text{N}}$ 值(相对北美页岩标准化值)显示为微弱负异常。表 2 中显示,万盛机枪台剖面石牛栏组灰岩样品的 $\delta(\text{Eu})_{\text{N}}$ 值介于 0.79~1.11 之间,其平均值为 0.91;习水吼滩剖面石牛栏组灰岩样品 $\delta(\text{Eu})_{\text{N}}$ 值介于 0.77~1.07 之间,平均值为 0.88。两剖面样品的 $\delta(\text{Eu})_{\text{N}}$ 值与北美页岩标准值($\delta\text{Eu} = 0.65$)相差较大。

(2) δCe 与 $\delta(\text{Ce})_{\text{N}}$

研究区石牛栏组灰岩的 Ce(相对球粒陨石标准化值)表现为弱负异常($\delta\text{Ce} = 0.79 \sim 0.96$, 平均 0.89)。在表 2 中,万盛机枪台剖面石牛栏组灰岩样

品的 δCe 的值介于 0.89~0.93 之间,平均为 0.905;习水吼滩剖面石牛栏组灰岩样品的 δCe 值介于 0.79~0.96 之间,平均 0.88。石牛栏组机枪台和吼滩两剖面灰岩样品的 δCe 值较为接近,且均表现为较弱负异常。

而研究区石牛栏组灰岩的 $\delta(\text{Ce})_{\text{N}}$ 值(相对北美页岩标准化值)显示为弱负异常($\delta(\text{Ce})_{\text{N}} = 0.75 \sim 0.88$, 平均 0.83)。表 2 中显示,万盛机枪台剖面石牛栏组灰岩样品的 $\delta(\text{Ce})_{\text{N}}$ 值介于 0.83~0.86 之间,平均 0.845;习水吼滩剖面石牛栏组灰岩样品的 $\delta(\text{Ce})_{\text{N}}$ 值介于 0.75~0.88 之间,平均值为 0.826。表明石牛栏组机枪台和吼滩两剖面样品 $\delta(\text{Ce})_{\text{N}}$ 值较接近,显示弱负异常。

3.4 稀土元素的配分模式

对研究区下志留统石牛栏组样品球粒陨石标准化处理^[18],两剖面的稀土配分模式大致相同(图 3),均为轻稀土较为富集、重稀土较为亏损。其中,La—Eu 段斜率较大,表现明显的“右倾”;Gd—Lu 段斜率较小,表现比较“平坦”;表明轻稀土之间的分馏比较显著,重稀土之间分馏细微。Eu 处呈现明显负异常的“V”字形,值表明沉积物的物源比较一致且相对稳定^[9]。

3.5 δCe 与 δEu 、 $w(\Sigma\text{REE})$ 的相关性

成岩作用可改变沉积物中稀土元素异常值,通常会导致 δCe 与 δEu 具有很好的相关性、 δCe 与 $w(\text{Dy})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 表现为很好的负相关、 δCe 与 $w(\Sigma\text{REE})$ 表现为很好的正相关^[19-20]。本次分析结果表明,两个剖面样品的 δCe 与 $w(\Sigma\text{REE})$ 、 δEu 之间相关性极差(图 4),说明沉积后的成岩作用对研究区石牛栏组灰岩稀土元素造成影响很小。因此,研究区的 δCe 、 δEu 值可以反映沉积物和古沉积介质的原始信息,可以利用其稀土元素地球化学特征对

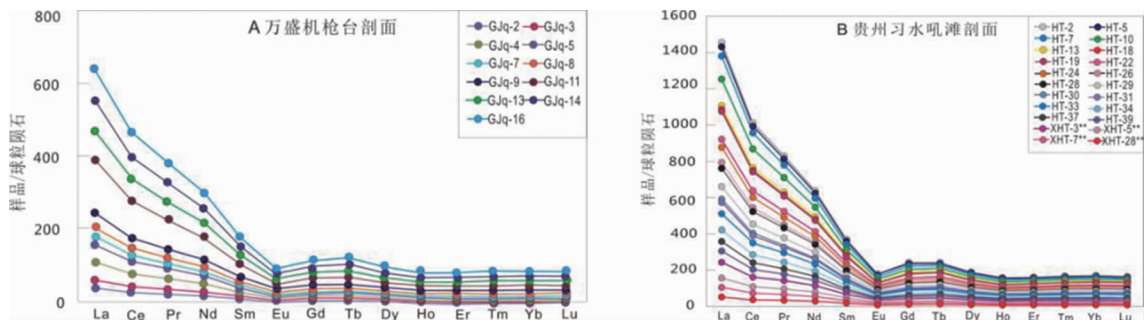


图 3 渝东南地区下志留统石牛栏组灰岩稀土元素配分模式图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of limestone in Silurian Shiniulan Formation, Southeastern Chongqing

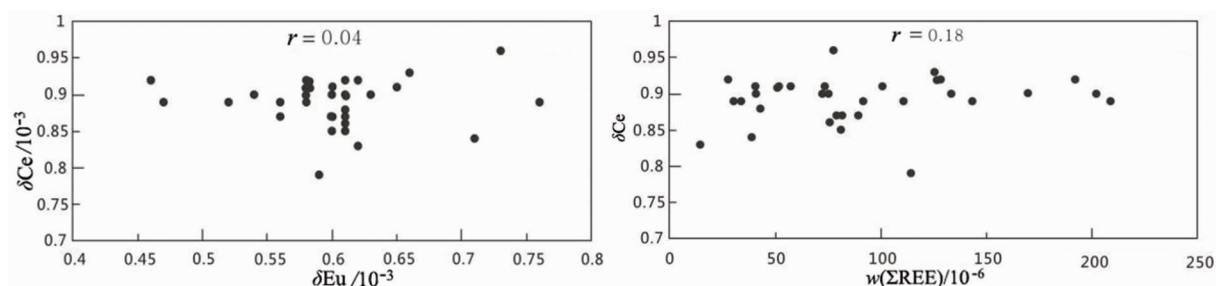


图4 研究区灰岩 δCe 与 δEu 和 δCe 与 $w(\Sigma\text{REE})$ 相关性图解

Fig. 4 Plot showing δCe — δEu and δCe — $w(\Sigma\text{REE})$ correlation of the limestone

研究区古环境进行研究和探讨。

4 稀土元素对古环境的指示意义

4.1 沉积水体变化规律

稀土元素地球化学特征在一定程度上能够反映沉积相特征,同一类型的沉积相越靠近深水环境其 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 值越大^[21]。万盛机枪台剖面石牛栏组三段灰岩样品 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 平均值为 12.02×10^{-6} , 四段 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 平均值为 4.27×10^{-6} (图5),表明机枪台地区下古生界石牛栏组三段时期沉积水体较四段深。这与万盛机枪台石牛栏组三段时期为混积深水陆棚环境、四段时期为混积浅水陆棚环境^[12]完全吻合(图6)。习水吼滩剖面石牛栏组自下而上,一段的 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 平均值为 7.43×10^{-6} ,二段的 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 平均值为 7.71×10^{-6} ,三段 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 平均值为 7.78×10^{-6} ,四段 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 平均值为 2.82×10^{-6} (图5),表明石牛栏组一段沉积水体较二段浅,二段的沉积水体较三段浅,而三段的沉积水体又比四段深。这与习水地区石牛栏组一段为混积浅水陆棚环境,二段为台地斜坡环境,三段混积深水陆棚环境,第四段为礁、滩环境^[12]完全吻合(图6)。在横向展布上,万盛机枪台地区石牛栏组三段和四段的水体均较习水地区深;万盛机枪台地区石牛栏组三段时期到四段时期的沉积水体变浅速度较习水吼滩地区更为剧烈。上述两剖面地区石牛栏组三段沉积时期均为混积深水陆棚环境、四段沉积时期万盛地区为混积浅水陆棚环境,而习水吼滩地区则为礁、滩环境^[12](图6),习水吼滩地区石牛栏组三段时期到四段时期的沉积水体变浅程度较万盛机枪台地区更为剧烈,这也证实了习水吼滩地区当时海洋沉积环境,以及生物礁的大量发育^[11]。

4.2 氧化-还原条件

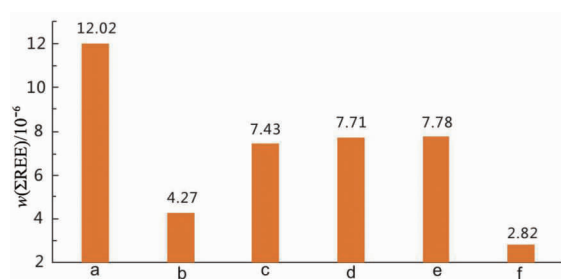


图5 研究区两剖面 $w(\Sigma\text{REE})_n$ 平均值直方图

Fig. 5 Histogram of $w(\Sigma\text{REE})_n$ average value of two sections of the study area

- a. 万盛机枪台剖面石牛栏组第三段; b. 万盛机枪台剖面石牛栏组第四段; c. 习水吼滩剖面石牛栏组第一段; d. 习水吼滩剖面石牛栏组第二段; e. 习水吼滩剖面石牛栏组第三段; f. 习水吼滩剖面石牛栏组第四段

沉积岩中稀土元素地球化学特征在一定程度上能够揭示沉积水介质氧化还原环境^[14,22],尤其是沉积岩中稀土元素 Ce 和 Eu 的异常情况和价态变化可以反映沉积物沉积时水介质的氧化还原环境^[23]。当沉积水介质为还原环境时,Ce 由 Ce^{4+} 变为 Ce^{3+} ,水体中 Ce^{3+} 浓度升高使海水转变为正异常,而沉积物出现 Ce 的负异常;Eu 由 Eu^{3+} 被还原成 Eu^{2+} ,水体中 Eu^{2+} 的浓度升高,而沉积物出现 Eu 的负异常。若水体富氧, Ce^{3+} 浓度就会降低,沉积物就会出现 Ce 的正异常; Eu^{2+} 的浓度降低,沉积物显示正异常。 δCe 值还可以指示海相环境,在开阔海域及外海,Ce 严重负异常;而在陆地内闭塞的海中、浅海区和边缘海, δCe 值正异常^[24]。

万盛机枪台石牛栏组剖面灰岩样品的 $\delta(\text{Eu})_n$ 值介于 0.79~1.11 之间,平均值为 0.91, Eu 表现微弱负异常;三段样品 $\delta(\text{Eu})_n$ 值范围 0.79~0.96,平均 0.89;四段样品 $\delta(\text{Eu})_n$ 值范围为 0.85~1.11,平均 0.93(表2、图7)。表明万盛机枪台地区石牛栏组三段的还原性比四段强,这也印证了石牛栏组

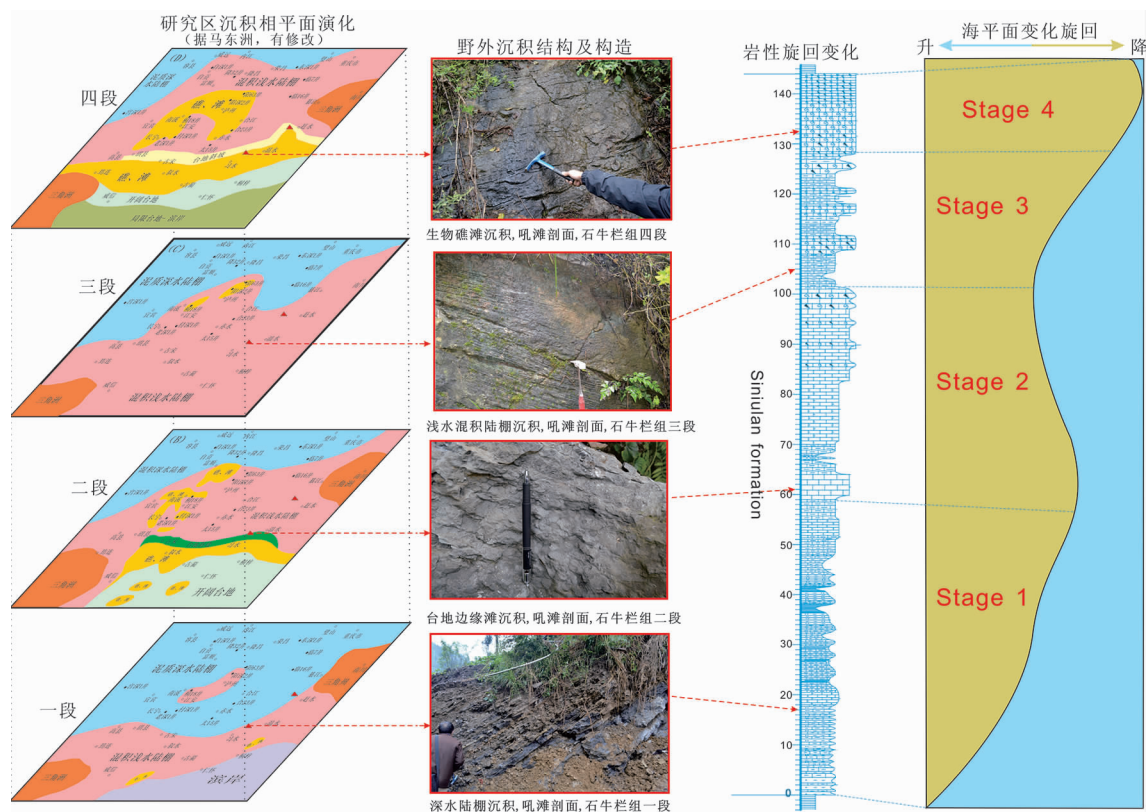


图 6 沉积响应与海平面变化关系图

(据谭先锋资料改编)

Fig. 6 Deposition response-sea level change plot

四段时期海平面快速下降,导致了水体变浅的特征。习水吼滩石牛栏组剖面灰岩样品的 $\delta(\text{Eu})_n$ 值介于 0.77~1.07 之间,平均 0.88;一段灰岩样品 $\delta(\text{Eu})_n$ 值介于 0.87~0.90 之间,平均值为 0.89;二段的 $\delta(\text{Eu})_n$ 值介于 0.84~0.89 之间,平均 0.86, Eu 表现弱负异常;三段 $\delta(\text{Eu})_n$ 值介于 0.69~0.1.07 之间,平均 0.85;四 $\delta(\text{Eu})_n$ 值介于 0.90~1.05 之间,平均值为 0.98(表 2、图 7)。表明习水吼滩石牛栏组一段的沉积环境的还原性弱于二段,这可能是由于石牛栏组二段期间习水地区海平面上升,水体变深所致;石牛栏组二段的还原性强于三段,这表明虽然海平面持续上升,但由于生物礁大量发育,导致沉积水体相对变浅;石牛栏组三段的还原性比四段强,其原因在于四段时期海平面快速下降,沉积水体急剧变浅,还原性减弱,氧化性增强。 $\delta(\text{Eu})_n$ 值还表明,在横向上万盛地区石牛栏组四段水体的氧化性弱于习水地区,这也印证了习水吼滩地区当时的礁、滩环境。

石牛栏组万盛机枪台和习水吼滩两剖面灰岩样品的 $\delta(\text{Ce})_n$ 值范围为 0.75~0.88,平均值为 0.83

(表 2), Ce 表现为较为微弱的负异常,表明渝东南地区下志留统石牛栏组的沉积环境为弱还原环境;Ce 显示微弱亏损,还表明研究区在石牛栏组沉积时期属于边缘海、浅海区 and 陆地内闭塞的海洋环境。

Elderfield 等^[25]提出了 Ce_{anom} 值的计算公式:

$$\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg[3w(\text{Ce})_n / [2w(\text{La})_n + w(\text{Nd})_n]]$$

式中, n 表示北美页岩标准化。 Ce_{anom} 值可以用来判断和识别古沉积流体的氧化还原环境: $\text{Ce}_{\text{anom}} < -0.1$, 说明 Ce 负异常,表明古水介质为氧化环境; $\text{Ce}_{\text{anom}} > -0.1$, 表示 Ce 正异常,表明古水介质为缺氧环境。石牛栏组万盛机枪台和习水吼滩两剖面灰岩样品的 Ce_{anom} 值,除了 HT10、HT39 两个样品的 Ce_{anom} 值 < -0.1 外,其余都是 $\text{Ce}_{\text{anom}} > -0.1$, 且在 $-0.1 \sim -0.05$ 之间波动(表 2、图 7),反映下志留统石牛栏组沉积时期其沉积环境总体为弱还原环境。

微量元素特征比值 $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$ 亦可判断沉积环境的氧化还原条件, $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni}) \geq 0.7 \sim 0.8$ 为缺氧环境, $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$ 值在 0.46~0.6 之间为贫氧环境^[3,26]。石牛栏组万盛机枪台和习水吼滩两剖面灰岩样品的 $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$ 值,除了样品



图7 研究区两剖面样品 Ce_{anom} 及 $\delta(Eu)_n$ 值直方图

Fig. 7 Histogram of Ce_{anom} and $\delta(Eu)_n$ values of samples from two sections of the study area

GJq-2、GJq-13 和 HT-26 小于 0.46 之外,其余都大于 0.46,绝大部分介于 0.7~0.8 之间,亦显示研究区在石牛栏组沉积时期的古水介质是弱还原环境。

4.3 沉积速率

随着沉积环境的变化,稀土元素被吸附能力、各元素的电价等性质会发生相应的分异作用,在海洋环境中更为突出,主要表现为铈和铕与其它元素间的分离、轻稀土与重稀土之间的分离^[9,24]。大部分稀土元素以悬浮物或被碎屑矿物结合的形式入海,引起稀土元素分异差别的最重要因素之一是悬浮物或碎屑(岩屑、矿屑等)停留在海水中的时间长短区

别。当悬浮物停留在海水中的时间较长时,REE 随悬浮物缓慢沉积,分异强,使 REE 进入海水有足够的时间与有机质络合、被黏土吸附^[24],此类样品采用北美页岩标准化后,其轻、重稀土元素显示富集或亏损,REE 配分模式变化显著, $w(La)_n/w(Yb)_n$ 值明显小于 1 或大于 1。铈因为价态的变化发生选择性分异:在缺氧条件下海水负异常消失或出现正异常,沉积物中甚至出现负异常;氧化环境中易以正四价铈沉淀,沉积物为显著正异常^[27]。当悬浮物在海水中停留时间较短时,REE 随悬浮物快速沉积,分异作用弱,对此类沉积岩样品北美页岩标准化后,

Ce 出现弱负异常或基本正常,稀土元素配分模式较为平坦,配分曲线斜率 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值为 1 左右。因此,可以认为 REE 的分异强弱是沉积物沉降速率快慢的指标,即样品的 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值越大、 $\delta(\text{Ce})_n$ 值与 1 相差越大,沉积速率越慢。

万盛机枪台地区 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值介于 0.98~1.34 之间(表 2),平均值为 1.1, $\delta(\text{Ce})_n$ 的值介于 0.83~0.86 之间,平均值为 0.846。自下而上该值呈降低的趋势,反映沉积速率升高的趋势。该剖面石牛栏组第三段 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 的平均值为 1.1,第四段 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 的平均值为 1.07,反映了该剖面第三段的沉积速率较第四段慢,也响应了前文讨论的水体深浅和氧化还原性的强弱。石牛栏组第三期 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值呈升高的趋势(图 8),反映了该时期沉积速率变慢的特点,与当时海平面上升、沉积水体变深相对应;而第四期则刚好相反,其 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值是降低的趋势(图 8),沉积速率变快,与当时海平面下降、沉积水体变浅相对应。

习水吼滩地区 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值介于 0.59~1.91 之间(表 2),平均值为 1.17, $\delta(\text{Ce})_n$ 值介于 0.75~0.88 之间,平均值为 0.814。自下而上该值总体上显示升高的趋势,亦反映沉积速率降低的趋势。该剖面石牛栏组第一段 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 的平均值为 1.07,第二段 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 的平均值为 1.13,第三段 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 的平均值为 1.16,第四段 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 的平均值为 0.81,表明了该剖面第一段的沉积速率较第二段快,第二段较第三段快,第四段的沉积速率急剧变大、远大于前三段,这与前文讨论的水体深浅和氧化还原性的强弱一致。石牛栏组第一期其 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值是升高的趋势(图 8a),反映了该时期沉积速率变慢,沉积水体变深的特点,与当时海平面上升、沉积水体变深相对应;第二、三期基本上继承了第一期的沉积特点, $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值是升高的趋势(图 8b、图 8c),沉积速率变慢,海平面缓慢上升,沉积水体变深;而在第四期则与前三期相反,其 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值是急

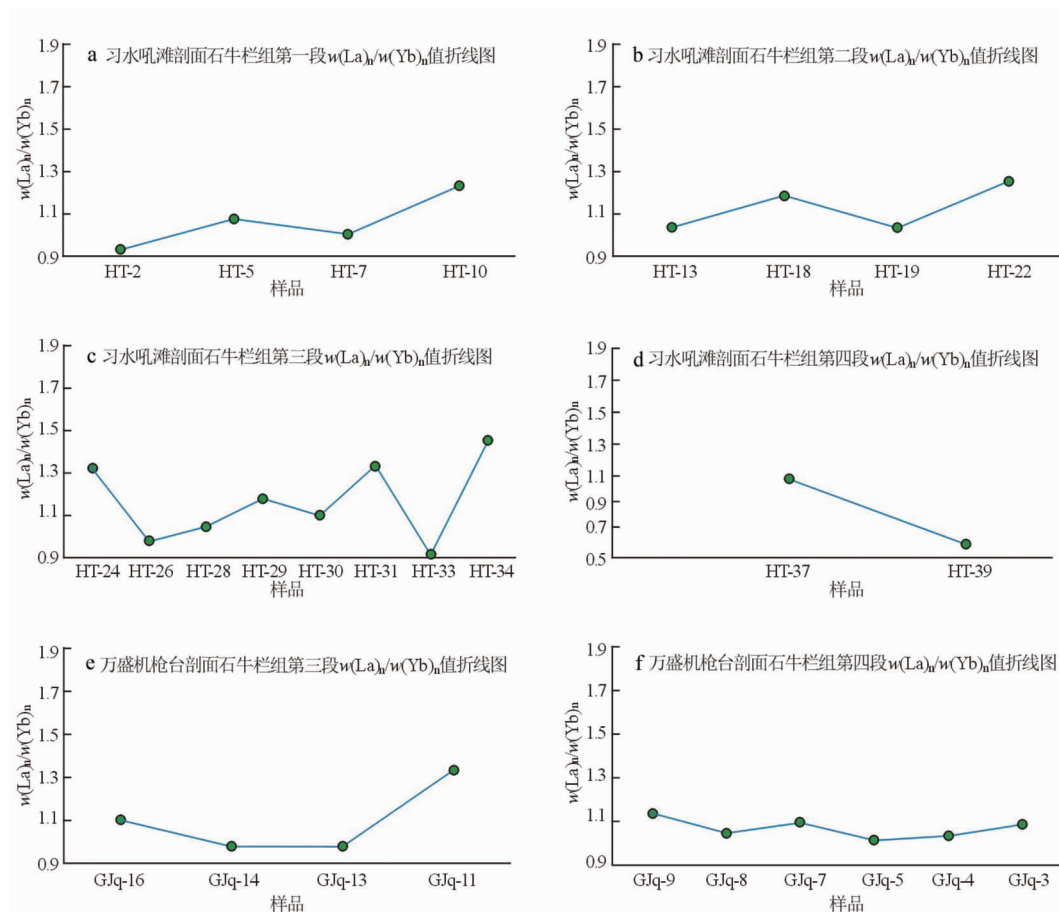


图 8 研究区两剖面样品 $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ 值趋势线图

Fig. 8 Diagram showing trend line of $w(\text{La})_n/w(\text{Yb})_n$ values of samples from the study area

剧降低的趋势(图 8),沉积速率变快,响应了海平面急剧下降,水体剧烈变浅的古海洋环境。

沉积速率的变化,也在一定程度上反映了沉积水体深浅的变化和细沉积颗粒中有机质的聚集程度。从万盛→习水地区,石牛栏组第三期 $\omega(\text{La})_n/\omega(\text{Yb})_n$ 值整体上是万盛比习水低(图 8c,图 8e),表明由重庆东南→贵州西北地区的沉积速率呈现降低的趋势;石牛栏组第四期 $\omega(\text{La})_n/\omega(\text{Yb})_n$ 值在习水突然降低(图 8d,图 8f),即万盛较习水升高,表明由重庆东南→贵州西北地区的沉积速率呈现升高的趋势。总体来看,万盛地区下志留统石牛栏组沉积速率比习水地区快,表明万盛地区较习水地区距物源区更近,且水体相对较浅。对于贵州习水地区石牛栏组第四期 $\omega(\text{La})_n/\omega(\text{Yb})_n$ 的值急剧降低,笔者认为,不是物源方向发生变化而导致沉积速率的

快速变化,而是该时期此处生物礁的大量发育而引起的变化。

5 稀土元素对物源的指示意义

有研究资料表明,物质来源是构成沉积物中稀土元素的首要要素^[28]。稀土元素具备相对稳定的性质,其停留在水体中的时间又十分短暂,进入细粒沉积物的速度快并且不发生分异,沉积后的风化、成岩作用对源岩中的稀土元素影响很小,对物源区的原始地球化学信息起很好地保存作用^[28]。因此,可以利用稀土元素这种特性进行沉积物物质来源分析^[29-30],即相同来源的物质一般都具有十分相似的稀土配分模式曲线图式^[31]。

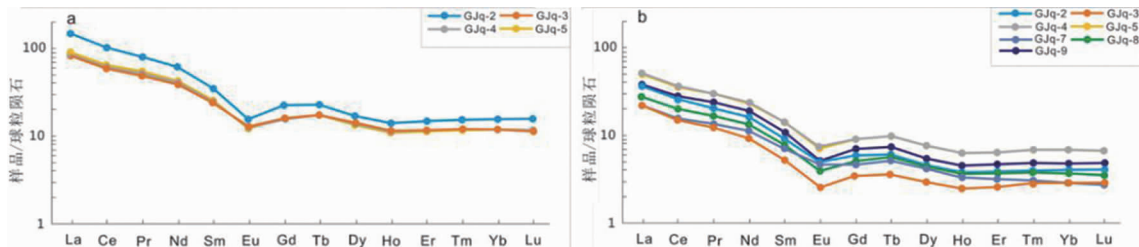


图 9 万盛机枪台下志留统石牛栏组灰岩稀土元素配分模式图

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns for the Shiniulan limestone along Jiqiangtai Section

a. 石牛栏组第三段灰岩分配模式; b. 石牛栏组第四段灰岩分配模式

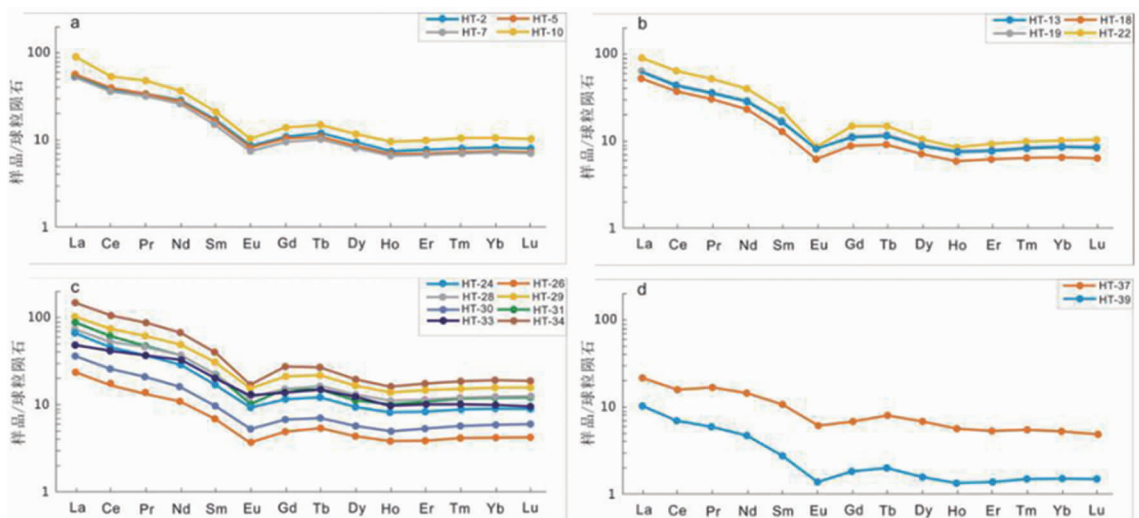


图 10 习水吼滩下志留统石牛栏组灰岩稀土元素配分模式图

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns for Shiniulan limestone along Houtan Section

a. 石牛栏组第一段灰岩分配模式; b. 石牛栏组第二段灰岩分配模式
c. 石牛栏组第三段灰岩分配模式; d. 石牛栏组第四段灰岩分配模式

万盛机枪台下志留统石牛栏组三阶段—四阶段灰岩稀土元素配分模式图(图 9)、习水吼滩下志留统石牛栏组灰岩一阶段—四阶段稀土元素配分模式图(图 10)显示,研究区的稀土元素配分形式为轻稀土富集型,且存在明显铈负异常、铈基本接近于正常,与上地壳稀土元素的配分模式相似;同时,两剖面石牛栏组各段样品的稀土元素配分模式十分类似,表明两个地区的沉积物的物质来源一致。

研究区石牛栏组沉积时期的物源可能来自于其西南方向的黔中古隆起、西北方向的川中古隆起或南东东方向的雪峰山古隆起。自震旦纪到早志留世,西南方向的黔中古隆起和西北方向的川中古隆起均以碳酸盐岩沉积为主^[32],如果石牛栏组的物源来自于黔中古隆起和川中古隆起,那么渝东南地区石牛栏组灰岩的物源应该为碳酸盐岩;但本次样品的测试结果显示(图 11),除了一点位于沉积岩之外,其它全部位于沉积岩、沉积岩与碱性玄武岩和花岗岩的混合区域,说明其物源是沉积岩、沉积岩与碱性玄武岩和花岗岩的混合区域,因此石牛栏组物源应来自于南东东方向的雪峰山隆起。此结果与观音桥石牛栏组灰岩的研究结果^[8,34]显示了良好的一致性。

现代和古代沉积物的物源区性质和大地构造背景也常用稀土元素特征进行判断^[35]。朱志军等^[3]、王国茹等^[24]对川东南小河坝组砂岩的物源研究表

明,其物源区也来自于雪峰山隆起,为活动型大陆边缘抬升基底的大地构造背景。而本次研究区的石牛栏组与小河坝组是同期异相的地层单元,用稀土元素的地球化学特征得出了其物源同样来自于雪峰山隆起,理应属于活动型大陆边缘抬升基底的大地构造背景。

6 结论

(1)渝东南地区石牛栏组稀土元素总量显著低于北美页岩和大陆上地壳平均值,轻稀土富集,重稀土亏损,轻、重稀土元素分异显著,稀土元素配分模式表现为显著“右倾”,负 Eu 异常明显,Ce 负异常微弱(接近于正常)。

(2)渝东南地区石牛栏组沉积环境,属于弱还原环境;自下而上从一段到四段经历了沉积水体由浅缓慢变深再急剧变浅的变化过程,且沉积速率总体上呈现降低趋势;横向上万盛地区沉积速率比习水地区高。

(3)渝东南地区石牛栏组物源源自雪峰山隆起,源岩为花岗岩、碱性玄武岩和沉积岩,主要为沉积岩;沉积构造环境属于活动型大陆边缘抬升基底的大地构造背景。

参考文献:

- [1] 朱志军. 川东南地区志留系小河坝组沉积体系及物质分布规律研究[D]. 成都:成都理工大学, 2012.
- [2] 朱如凯, 郭宏莉, 何东博, 等. 中国西北地区石炭系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2002, 16(2): 130-136.
- [3] 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.
- [4] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Black well, 1985.
- [5] Condie K C. Another look at rare earth elements in shales [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1991, 55: 2527-2531.
- [6] 金秉福, 林振宏, 季福武. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 99-106.
- [7] Cullers R L. Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediment formed by intense weathering of the dauburg granite[J]. Georgia USA Lithos, 1988, 21: 301-304.
- [8] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contributed Mineralogy Petrology, 1986, 924: 181-193.

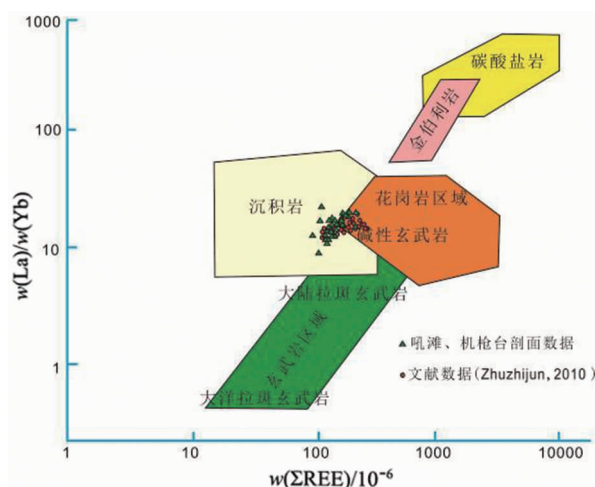


图 11 渝东南地区下志留统石牛栏组灰岩 $w(\Sigma\text{REE})-w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 图解

(底图据文献[33]绘制)

Fig. 11 $w(\Sigma\text{REE})-w(\text{La})/w(\text{Yb})$ diagram of limestone in Silurian Shiniulan Formation, Southeast Chongqing

- [9] 李双建, 肖开华, 沃玉进, 等. 湘西、黔北地区志留系稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 273-280.
- [10] 文玲, 胡书毅, 田海芹. 扬子地区志留系岩相古地理与石油地质条件研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 11-14.
- [11] 谭先锋, 李志军, 蒋艳霞, 等. 渝东南地区下志留统石牛栏组混合沉积作用及对生物礁发育的制约[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(3): 6-9.
- [12] 马东洲, 陈洪德, 朱利东, 等. 川南下志留统石牛栏组沉积体系与岩相古地理[J]. 成都理工大学学报, 2006, 33(3): 228-232.
- [13] 赵振华. 某些常用稀土元素地球化学参数的计算方法及其地球化学意义[J]. 地质地球化学, 1985(增刊): 126.
- [14] 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.
- [15] 朱如凯, 郭宏利, 何东博, 等. 祁连—柴达木盆地北缘地区石炭系泥岩沉积地球化学特征[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 45-52.
- [16] 余小灿, 王春连, 刘成林, 等. 江陵凹陷古新统沉积岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2014, 33(5): 1057-1068.
- [17] 葛运华, 刘丽, 高振军. 织纳地区上二叠统稀土元素特征及其地质意义[J]. 山西焦煤科技, 2011, 1(1): 16-21.
- [18] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. London, England: Blackwell Scientific Publication, 1985: 1-312.
- [19] 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: 29-48.
- [20] 陈文彬, 谭富文, 伊海生, 等. 羌塘盆地那底岗日地区布曲组碳酸盐岩烃源岩稀土元素分布特征及意义[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 529-536.
- [21] 李红敬. 扬子地区二叠系典型剖面层序地层分析及优质烃源岩判识[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009.
- [22] 杨卫东, 肖金凯, 于炳松, 等. 滇黔磷块岩沉积学、地球化学与可持续发展战略[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [23] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [24] 王国茹, 陈洪德, 朱志军, 等. 川东南—湘西地区志留系小河坝组砂岩稀土元素特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 487-495.
- [25] Elderfield H, Greaves M J. The rare earth elements in sea water [J]. Nature, 1982, 296(18): 214-219.
- [26] 李双应, 金福全. 下扬子地区二叠纪缺氧环境沉积物 V/(V+Ni)特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1995, 14(3): 170-173.
- [27] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 高演化海相碳酸盐烃源岩地球化学综合判识——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 中国科学: D 辑, 2006, 36(2): 167-176.
- [28] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 164-167.
- [29] 蔡观强, 郭峰, 刘显太, 等. 沾化凹陷新近系沉积岩地球化学特征及其物源指示意义[J]. 地质科技情报, 2007, 26(6): 17-26.
- [30] 刘锐娥, 黄月明, 卫孝锋, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代物源区分析及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2003, 23(3): 82-86.
- [31] 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 449-456.
- [32] 侯明才, 陈洪德, 陈安清. 江南—雪峰隆起对川东南—黔北凹陷石牛栏期沉积古地理的制约[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(4): 395-400.
- [33] 刘岫峰. 沉积岩实验室研究方法[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 213-218.
- [34] 张廷山, 陈晓慧, 兰光志, 等. 川东南地区志留纪稀土元素分布及其地质意义[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(3): 26-30.
- [35] 侯伟, 刘招君, 何玉平, 等. 砂岩稀土元素地球化学特征在沉积物源区分析中的应用——以中国东北漠河盆地中侏罗统为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 285-293.

The REE geochemical characteristics and the geological significance of Shiniulan Formation in Southeast Chongqing

WANG Jie¹, TAN Xianfeng^{1,2}, CHEN Hao³, CHEN Qing^{1,2}, RAN Tian¹, WANG Jia^{1,2}, JIANG Wei¹

(1. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of Exploration and Development of Complex Oil and Gas Fields in Chongqing, Chongqing 401331, China;

3. Hydro-geological engineering team 208, Chongqing GEOLOGICAL exploration Bureau, Chongqing 400700, China)

Abstract: Lower Silurian Shiniulan Formation in Southeastern Chongqing is an important oil and gas res-

ervoir. Study on its paleo-environmental changes, source material and tectonic setting is of great significance. $w(\Sigma\text{REE})$, REE pattern, characteristic value of $w(\Sigma\text{LREE})/w(\Sigma\text{HREE})$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$, $w(\text{Ce})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$, $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$, δEu , δCe , Ceanom is applied to deepen the study. The results show slightly lower value of ΣREE in Shiniulan Formation than the average value of the continental crust; relatively LREE enrichment and HREE depletion, obvious Eu anomaly and weak Ce anomaly. The value of $w(\Sigma\text{REE})$ confirms that the water body from which Shiniulan formation deposited experienced a gradual shallow-deep then abrupt deep-shallow change process. Negative anomaly of Eu, slight negative anomaly of Ce and Ceanom value reveal the weak reduced seawater. Degree of REE fractionation reflects decrease of deposition rate from early to late. The REE ratio characteristics and $w(\Sigma\text{REE})-w(\text{La})/w(\text{Yb})$ diagrams show that the source material is mainly derived from sedimentary rocks of the Xuefengshan uplift.

Key Words: oil and gas reservoir; Lower Silurian Shiniulan Formation; REE; geochemistry; Southeastern Chongqing

《地质找矿论丛》关于稿酬、样刊问题的声明

《地质找矿论丛》在出版发行纸质刊的同时进行数字发行,数字版合作:中国知网、万方数据、维普数据、超星数据移动端、中教数据、CEPS 中文电子期刊,作者投稿时如无特殊声明,即视作同意授予我刊及我刊合作数据库信息网络传播权;我刊支付给作者的稿酬金额已经包括了此项授权的收入,也就是说《地质找矿论丛》编辑部邮寄给作者的稿酬已经包含了《地质找矿论丛》纸质刊及数字合作单位使用著作权费。

《地质找矿论丛》编辑部给予第一作者寄送当期样刊 2 本;若作者还另外需要,可以与编辑部联系、商议邮寄。

《地质找矿论丛》编辑部

2016 年 12 月 19 日