

文章编号: 1000-0550(2012)06-1061-11

四川盆地西缘地区中侏罗统沙溪庙组地球化学特征及其环境意义^①

钱利军 陈洪德 林良彪 徐胜林 欧莉华

(成都理工大学沉积地质研究院 成都 610059)

摘要 沉积岩的微量元素及稀土元素蕴含了大量的地质信息,它对沉积环境的水文变化有着较高的敏感度,是研究沉积物沉积时的古气候、古环境的有效手段。选取四川盆地西缘地区中侏罗统上、下沙溪庙组的17件样品进行了详细的微量元素及稀土元素的测定,应用了能够敏感反应沉积环境的微量元素指标及特征微量元素、稀土元素比值,对四川盆地西缘地区中侏罗统上、下沙溪庙组沉积时期的古环境、古气候进行了研究。结果表明:研究区上、下沙溪庙组Sr/Ba比值均小于1,说明沙溪庙组沉积期湖水为淡水;V、U、Mo、V/Cr、Ni/Co、U/Th、(Cu+Mo)/Zn、V/(V+Ni)、 δCe 、 δEu 、 ΣREE 、La/Yb微量元素及稀土元素特征值及比值,说明整个沙溪庙组沉积时期湖泊底层水体总体上为中等分层的含氧环境;根据Sr/Cu比值及前人研究成果认为下沙溪庙组沉积期整体表现为温暖干旱,局部时期转凉,此后上沙溪庙组沉积期又转变为类似于下沙溪庙沉积期的温暖干旱的气候环境,且干旱程度逐渐加强。

关键词 四川盆地 中侏罗统 沙溪庙组 微量元素 稀土元素 古气候 古环境

第一作者简介 钱利军 男 1985年出生 博士研究生 沉积学 E-mail: qlj0321@163.com

中图分类号 P595 **文献标识码** A

0 引言

沉积岩中元素的分布是沉积分异与地球化学演化的结果^[1,2],在沉积过程中,沉积物与水介质之间有着复杂的地球化学交换与吸附。这种交换与吸附除了与元素本身性质有关外,还受到水介质物理化学条件的影响。而某些微量元素、稀土元素及其比值受到风化、搬运、沉积、成岩等物理化学作用的影响较小,因此,这对识别沉积物沉积时的古气候、古环境等具有重要的意义^[3~6]。

川西前陆盆地是在挤压构造背景下形成的构造活动性盆地^[7~9]。其形成开始于印支运动末期,经历了燕山运动和喜山运动,各时期的构造运动对盆地中的地层沉积、构造形成、油气成藏等方面的作用各异^[10]。四川盆地自流井组沉积时期,全盆地发育大型陆相湖泊^[11,12]。早侏罗世沉积后(千佛崖组),有一次区域性上升活动,沿龙门山发育河流相、泛滥平原相^[13,14]。至中侏罗世中期(下沙溪庙组),沉积格局有了较大的变化,由于盆地北部和东部强烈上升,逐渐封闭了湖盆的东出水通道,直到上、下沙溪庙组沉积早期改经西昌、会理进入滇中后入海,区域性的

上升导致河流相沉积为主^[11]。研究区川西坳陷中段,处于河湖交替相区。有学者认为沙溪庙组沉积时期在雨季洪泛时期,河间洼地或废弃河道形成湖泊环

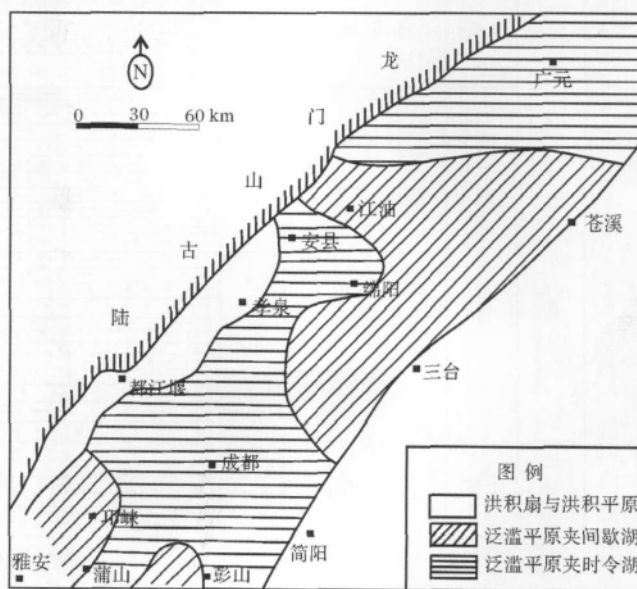


图1 川西地区中侏罗世晚期沉积环境图(据参考文献[13]有改)

Fig. 1 Sedimentary environment map of the late period of middle Jurassic in western Sichuan Province

(Modified from reference [13])

^①国家自然科学基金项目(批准号:40739901)和国家科技重大专项(编号:2011ZX05002-004-006HZ)资助。

收稿日期:2011-11-20; 收修改稿日期:2012-02-23

境,常年干旱,湖水干涸成为时令湖或间歇湖,这种湖泊与通常意义的湖泊有很大的区别,在于沉积地层中有机质含量很低,动、植物化石罕见,湖泊的沉积是受到了雨季和旱季的控制^[13](图1)。因此,详细探讨区内沙溪庙组沉积时期的古气候对认识沙溪庙组沉积时期的古环境具有重要的意义。

很多学者对四川盆地侏罗系进行了大量的研究,取得了大量的认识成果^[15~20]。但对中侏罗统沙溪庙组元素地球化学特征的研究较少。本文以四川盆地西缘地区中侏罗统沙溪庙组泥岩、页岩为研究对象,重点通过分析泥岩、页岩样品的微量元素及稀土元素地球化学特征来探讨沙溪庙组沉积时期的古环境。

1 区域地质概况及采样位置

四川盆地西缘地区属于扬子地台西缘,位于米仓山—大巴山山脉前缘地带,西临龙门山逆冲推覆构造带。由于特殊的构造组合格局,使得沉积厚度较大^[7,11,21,22]。盆地中充填有晚三叠世至始新世地层,以上三叠统至下侏罗统为最重要的沉积地层,亦是目

前油气勘探的重点层位。

四川盆地西缘地区侏罗系自下而上包含的地层单元有:中侏罗统千佛崖组(盆地内部称新田沟组)、沙溪庙组(分上、下两段,上段常称为“上沙溪庙组”,下段常称为“下沙溪庙组”)(图2),上侏罗统遂宁组和莲花口组(往盆地内部称蓬莱镇组)。侏罗系底部下侏罗统地层被剥蚀,与下伏须家河组呈角度不整合接触,侏罗系顶部与白垩系剑门关组砾岩呈平行不整合接触。沙溪庙组主要由灰、灰紫色厚层至块状粗、中粒至细粒长石石英砂岩、长石砂岩、紫红色粉砂岩、泥岩组成的数个不等厚韵律层组成。

样品采自四川盆地西缘地区中侏罗统上、下沙溪庙组,主要是分布于孝泉、大邑鸭子河、温江等地区的钻井岩芯(图3)。从大量样品中选取17件进行了微量元素及稀土元素的测试分析。样品的岩性主要为紫红色、灰绿色及杂色块状泥岩。

2 样品处理及测试结果

样品的化学处理及测试均由中国科学院青岛海



比例尺 1:30000

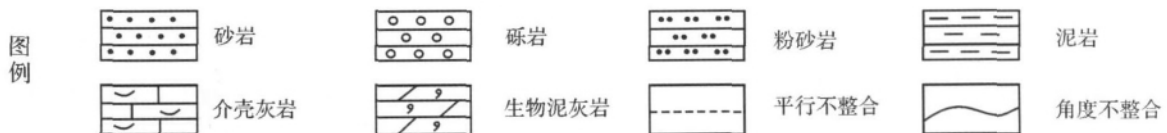


图2 川西地区侏罗系岩性柱状图(据参考文献[23]有改)

Fig. 2 Lithological column of Jurassic in western Sichuan Province(modified from reference [23])

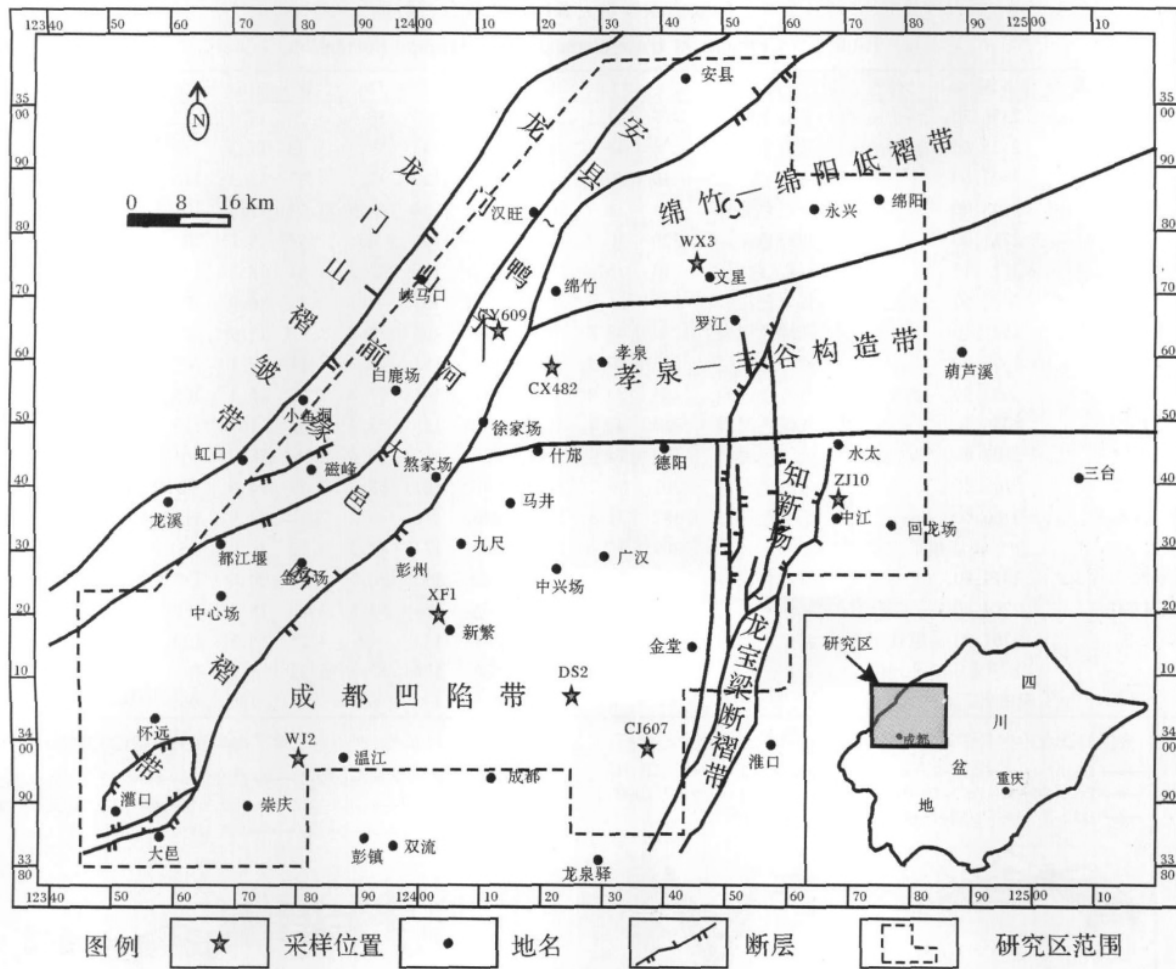


图 3 采样位置分布(据参考文献[24]有改)

Fig. 3 Distribution of sampling location(modified from reference [24])

洋研究所分析与检测中心进行。样品破碎后放入玛瑙钵中研磨至 200 目,然后装袋送样。称取 40 g 样品于 Teflon 溶样罐中,加入 0.6 ml HNO₃和 2 ml HF 封盖,静置 2 h 后,放在 150°的电热板上溶样 24 h。加入 0.25 ml 的 HClO₄于电热板上敞开蒸酸至干。加入 1 ml HNO₃和 1 ml H₂O 密闭于 120°电热板回溶 12 h。用高纯度 H₂O 定溶至 40 g,然后再 ICP—MS 上进行测试,各种标准样品(GSR-1、GSR-3、BHVO-2、BCR-2) 及空白样品所测稀土元素线性较好,分析误差基本小于 5% 测试结果准确可信,测试数据如表 1。

根据对川西拗陷中侏罗统沙溪庙组泥岩的样品微量元素与平均泥岩含量标准化后,可以发现上、下沙溪庙组微量元素特征相似(图 4)。其中 Ga、Ba、V、Th、Cr、Zn 元素的平均值比平均泥岩含量略高,Mo 元素的平均值较平均泥岩含量低,Sr、Cu、Ni、U、Co 元素

的平均值与平均泥岩含量相当。

通过对样品的稀土元素分析及经北美页岩标准化,上沙溪庙组稀土元素总量 Σ REE 值介于 171.5 ~ 249.2 $\mu\text{g/g}$ 之间,平均值为 212.86 $\mu\text{g/g}$;下沙溪庙组 Σ REE 值介于 189.6 ~ 232.9 $\mu\text{g/g}$ 之间,平均值为 222.53 $\mu\text{g/g}$ 。同北美页岩 Σ REE 值 173.21 $\mu\text{g/g}$ 相比属于富集,高于大陆上地壳(UUC) 平均值 148.14 $\mu\text{g/g}$ 。上沙溪庙组 Σ LREE 为 154.1 ~ 225.5 $\mu\text{g/g}$,平均值为 192.9, Σ HREE 为 16.72 ~ 23.47 $\mu\text{g/g}$,平均值为 20 $\mu\text{g/g}$, Σ LREE/ Σ HREE 的比值为 8.83 ~ 10.49。下沙溪庙组 Σ LREE 为 172.5 ~ 223.7 $\mu\text{g/g}$,平均值为 203 $\mu\text{g/g}$, Σ HREE 为 17.09 ~ 21.37 $\mu\text{g/g}$,平均值为 19.58 $\mu\text{g/g}$, Σ LREE/ Σ HREE 的比值为 10.10 ~ 10.48。经北美页岩标准化后,做出上、下沙溪庙组样品的 REE 分配模式图(图 5),总体特征一

表1 沙溪庙组微量元素地球化学分析数据

Table 1 Contents of trace elements in Shaximiao Formation

样品号	层位	井深/m	位置	岩性	Sr	Cu	Ga	Ba	V	Ni	U	Th	Cr	Co	Mo	Zn
CJ607-6	J ₂ s ²	2356.50	洛带地区	紫红色泥岩	207	27.2	28.5	684	143	56.3	3.29	17.4	122	19.3	0.76	147
DS2-20		2525.00	新都地区	紫红色泥岩	236	43.7	28.6	714	143	57.3	3.89	17.3	118	20.9	0.78	150
DS2-7		2693.60		杂色泥岩	210	50.6	28	1470	150	47.2	3.97	18.3	113	14.1	0.45	103
DS2-8		2693.90		紫红色泥岩	234	34.9	26.1	916	134	44.9	3.02	17.9	108	14.5	0.58	106
DS2-10		2711.00		灰绿色泥岩	226	40.2	24.4	486	106	48	2.53	15.1	102	18.6	0.19	113
DS2-5		2711.15		深绿灰色泥岩	213	57	27.8	1510	148	47.5	3.91	18.3	117	14.5	0.5	104
WX3-26		2427.60	文星地区	褐紫色泥岩	245	31.5	26.5	573	157	44.4	5.3	16.9	104	17.7	1.24	110
WX3-14		2585.40		灰绿色泥岩	239	48.8	32	594	206	53.5	12.05	17.9	122	30.5	0.78	128
WX3-15		2586.50		紫红色泥岩	245	79.3	28.2	594	152	43.3	4.17	17.1	107	17	1.52	119
XF1-8		3053.30	新繁地区	紫红色泥岩	184	23.2	23.7	582	144	51.4	3.03	16.1	105	18.4	0.95	119
XF1-9		3056.10		灰绿色泥岩	250	77.7	24.4	659	155	55.3	3.38	16	110	28.7	0.22	113
ZJ10-15		2107.40	中江地区	紫红色泥岩	170	24.3	24.7	457	110	50.4	3.6	16.6	91	17.9	1.33	115
ZJ10-14		2108.30		紫红色泥岩	209	36.2	21.2	1507	101	38.8	3.53	14.6	92	16.7	1.67	100
ZJ10-8		2166.00		紫红色泥岩	182	31.3	23.2	446	116	48.2	3.5	14.9	111	19.8	1.52	123
上沙溪庙组平均值					209	35.6	22.2	689	121	43.2	3.72	14.9	95	17.4	0.72	102
CX482-2	J ₂ s ¹	2479.80	孝泉地区	紫红色泥岩	304	21.8	32.6	1655	193	60.7	4.26	20.6	139	21.4	1.05	138
CY609-0		2244.80	鸭子河地区	灰绿色灰质页岩	135	43.8	29	593	159	54.8	3.48	18.3	138	20.9	0.1	108
WJ2-3		3361.30	温江地区	紫红色泥岩	133	22.3	21.6	441	123	48	3.25	15.5	100	15.4	0.3	103
下沙溪庙组平均值					202	32.8	21.6	536	124	52.8	5.23	16.4	101	25.6	1.03	135
泥质岩元素平均丰度					300	45	19	580	130	68	3.7	12	90	19	2.6	95

注: 数据测试在中国科学院青岛海洋研究所分析与检测中心进行; 样品微量元素单位为 μg/g; 泥质岩元素平均丰度引自参考文献[26]。

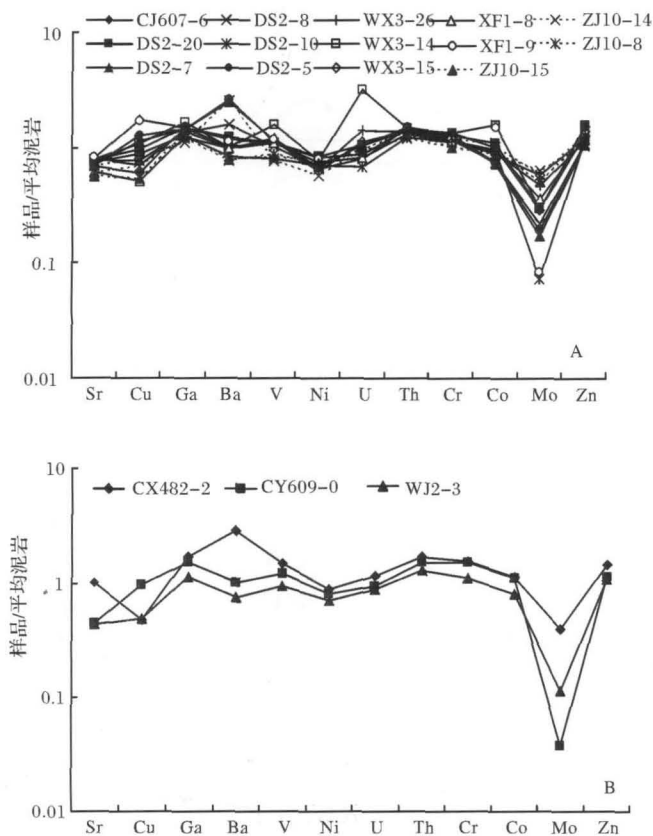


图4 沙溪庙组泥岩微量元素标准化图解

A. 上沙溪庙组; B. 下沙溪庙组

Fig. 4 Average mudstone-normalized trace elements patterns of mudstone in Shaximiao Formation

A. Upper Shaximiao Formation; B. Lower Shaximiao Formation

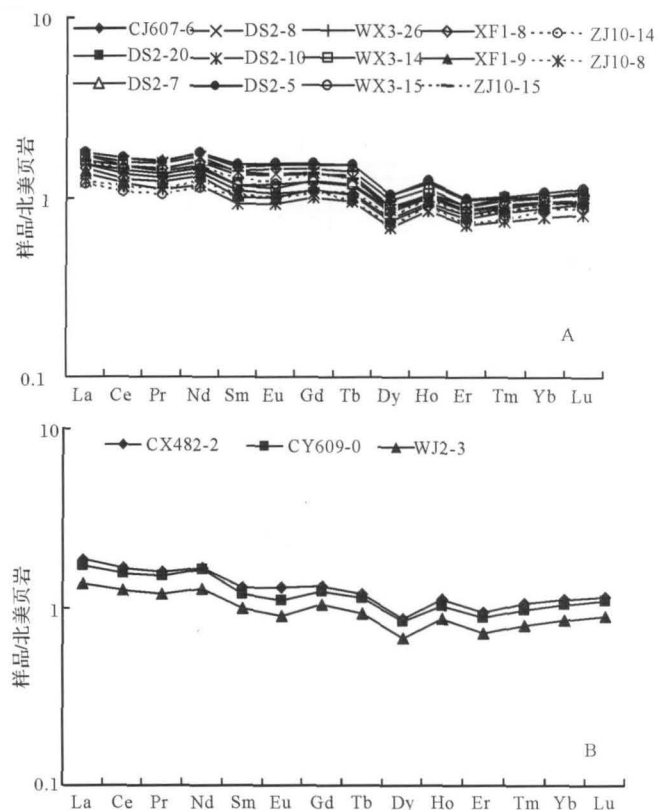


图5 沙溪庙组泥岩稀土元素标准化曲线

A: 上沙溪庙组 B: 下沙溪庙组

Fig. 5 NASC-normalized REE patterns of mudstone in Shaximiao Formation

A: Upper Shaximiao Formation B: Lower Shaximiao Formation

致,显示轻稀土元素弱富集,重稀土元素相对亏损,整体表现为“右倾斜型”,呈现小的“V”形。

Shiekds 等根据研究认为成岩作用会导致 δCe 、 δEu 具有良好的相关性, δCe 与 $(\text{Dy}/\text{Sm})_N$ 具有负相关性, δCe 与 ΣREE 具有较好的正相关性^[25]。根据对研究区沙溪庙组泥岩样品 δCe 、 δEu ; δCe 、 $(\text{Dy}/\text{Sm})_N$; δCe 、 ΣREE 图解(图6),可以看出它们均没有相关性。说明成岩作用对研究区稀土元素影响不明显。

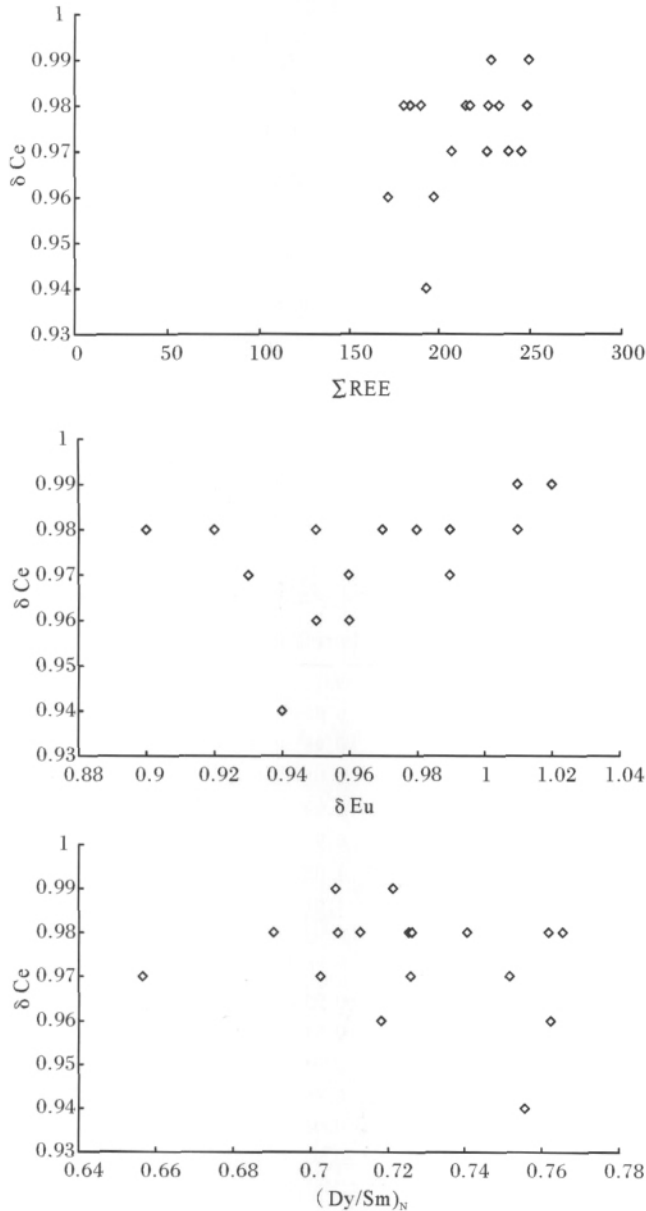


图6 沙溪庙组样品的 δCe — δEu 、 δCe — $(\text{Dy}/\text{Sm})_N$ 、 δCe — ΣREE 图解

Fig. 6 δCe — δEu δCe — $(\text{Dy}/\text{Sm})_N$ δCe — ΣREE diagrams of the samples from Shaximiao Formation

3 讨论

3.1 地球化学元素指示的古盐度特征

B 元素对于古盐度的反应较敏感,碳酸盐溶解度大,迁移能力强,只有当水蒸发后才可以析出。所以 B 元素可以作为古盐度的判别标志,其与水体盐度存在线性关系,即盐度越高,B 含量越大。但是 B 元素活动性强,影响因素较多,单独使用不妥^[27]。所以本文采用 Sr、Ba 元素作为判断研究区上、下沙溪庙组古盐度的判别标志。Sr、Ba 元素都属于碱土金属,二者化学性质相似,但在不同沉积环境中会发生差异分化,所以 Sr/Ba 比值常用来作为反应环境古盐度的重要参数^[1,28]。陆源碎屑沉积物经由河流搬运至海洋,由于水化学条件的变化,呈游离态的 Sr、Ba 发生分异。Sr 元素在搬运过程中不易于沉淀,也不易于被粘土矿物等吸附^[28-30]。所以游离态的 Sr 被搬入海,所以海水中的 Sr 含量远大于 Ba。Ba 元素较易于与海水中的硫酸根离子结合形成硫酸钡而发生沉淀。Ba 元素的离子半径较大,且具有比 Sr 元素小的水合能,更易于被粘土矿物等吸附,所以陆相及海陆过渡相的沉积物中 Ba 含量较高,而海洋中的 Ba 含量较少。曲星武等^[31]测定并归纳了多个地区的不同层位的 Sr、Ba 比,认为 Sr/Ba 比值 > 1 表示咸水, Sr/Ba 比值 < 1 表示淡水。同时也有学者对现代海洋的研究,认为在海洋环境下, Sr/Ba 比值 < 1; 在近岸海湾或沼泽中 Sr/Ba 比值较低,例如现代渤海湾 Sr/Ba 比值为 0.38^[32]。研究区下沙溪庙组 Ba 元素含量介于 441 ~ 1655 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间,平均值为 896.3 $\mu\text{g}/\text{g}$, Sr 元素含量介于 133 ~ 304 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间,平均值为 190.7 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。Sr/Ba 比值介于 0.18 ~ 0.3 之间,平均值为 0.24。上沙溪庙组 Ba 元素含量介于 446 ~ 1510 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间,平均值为 799.4 $\mu\text{g}/\text{g}$, Sr 元素含量介于 170 ~ 250 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间,平均值为 217.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。Sr/Ba 比值介于 0.14 ~ 0.47 之间,平均值为 0.32(如表 2)。这说明研究区上、下沙溪庙组均为淡水沉积环境。

Sr/Ba 比值小于 1,且 Ba 元素含量明显高于 Sr 元素含量,反映了陆内淡水环境。根据前人研究成果认为,沙溪庙组沉积期,由于区域抬升,四川盆地以广泛分布的河流相沉积为主,湖泊沉积范围逐渐缩小,在龙门山前缘地区发育冲积扇砾岩^[7,11,12,21,22],说明由于大量淡水输入,在沙溪庙组沉积时期湖水为淡水,这与本文地球化学指示的结果一致。

3.2 地球化学元素指示的氧化还原特征

V元素属于铁族元素,在缺氧环境中V元素易于以有机络合物的形式沉淀。当地层水中硫的浓度升高且沉积速率降低时,V元素的富集尤其加强^[33,34]。Ni元素在还原、碱性较大的条件下易于富集。在典型的成岩作用中,沉积物中微生物参与的有机质氧化消耗之后,沉积物呈现还原状态。当有氧进入沉积物内可以重新氧化,导致少量的U从富集区域迁移出来。但是V、Ni、Co、Cu、Zu等元素影响较小,最多可以造成很短距离内的迁移。在没有氧补充的情况下,沉积物中的V、Ni、Co、Cu、Zu等元素在成岩过程中不发生迁移^[35]。研究区采集的样品均为湖泊相沉积的块状泥岩,压实作用导致岩石较致密,且没有裂缝及破坏性构造,所以受到氧的影响较小。因此研究区的V、Ni、Co、Cu、Zu等元素代表了其原始沉积时期的特征。

Hatch1992年建立了 $V/(V+Ni)$ 比值反映氧化还原特性的指标: $V/(V+Ni)$ 比值介于0.84~0.89之间,反映水体分层性强,底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境; $V/(V+Ni)$ 比值介于0.54~0.82之间,反应为水体分层性中等; $V/(V+Ni)$ 比值介于0.46~0.60之间,反应为水体分层性弱^[36]。研究区下沙溪庙组 $V/(V+Ni)$ 比值介于0.72~0.76之间,平均值为0.74。上沙溪庙组 $V/(V+Ni)$ 比值介于0.69~0.79之间,

平均值为0.74(表2)这说明研究区上、下沙溪庙组沉积时期底层水体中等分层,湖水循环较为顺畅。氧化还原敏感微量元素V、U、Mo在沉积物或沉积岩中的含量受沉积环境的氧化还原状态控制,且来源单一,沉积和埋藏后不易发生迁移,是古环境重建的理想指标^[35,37]。当V、U富集,Mo不富集的时候可能指示缺氧环境,当V、U、Mo同时富集的时候,说明沉积时的水体中含有一定量的 H_2S ^[35,36,38,39]。本文以平均泥质岩中微量元素的丰度作为参照标准^[26],若样品中元素含量比平均泥质岩中元素丰度值高,表明富集,反之则亏损。研究区下沙溪庙组泥页岩样品中V元素的含量介于123~193 $\mu g/g$ 之间,平均值为158.3 $\mu g/g$;U元素的含量介于3.25~4.26 $\mu g/g$ 之间,平均值为3.7 $\mu g/g$;Mo元素的含量介于0.1~1.05 $\mu g/g$ 之间,平均值为0.5 $\mu g/g$ 。上沙溪庙组泥页岩样品中V元素的含量介于101~206 $\mu g/g$ 之间,平均值为140.4 $\mu g/g$;U元素的含量介于3.02~12.05 $\mu g/g$ 之间,平均值为4.2 $\mu g/g$;Mo元素的含量介于0.19~1.24 $\mu g/g$ 之间,平均值为0.9 $\mu g/g$ (表3)。而平均泥质岩中V元素的含量为130 $\mu g/g$,U元素的含量为3.7 $\mu g/g$,Mo元素的含量为2.6 $\mu g/g$ 。

表2 沙溪庙组特征微量元素及稀土元素比值

Table 2 Characteristic trace element and REE ratios of Shaximiao Formation

样品号	层位	V/Cr	Sr/Ba	Sr/Cu	$V/(V+Ni)$	U/Th	Ni/Co	(Cu+Mo)/Zn	δEu	δCe	La/Yb	ΣREE
CJ607-6	上沙溪庙组	1.17	0.3	7.6	0.72	0.19	2.92	0.19	0.96	0.97	16.39	206.8
DS2-20		1.21	0.33	5.4	0.71	0.23	2.74	0.3	0.98	0.98	17.34	227.1
DS2-7		1.33	0.14	4.15	0.76	0.22	3.34	0.5	1.01	0.98	17.34	248
DS2-8		1.24	0.26	6.71	0.75	0.17	3.09	0.34	0.99	0.97	18.18	238
DS2-10		1.04	0.47	5.63	0.69	0.17	2.59	0.36	0.97	0.98	17.34	183.9
DS2-5		1.26	0.14	3.73	0.76	0.21	3.28	0.55	1.02	0.99	16.46	249.2
WX3-26		1.51	0.43	7.76	0.78	0.31	2.51	0.3	1.01	0.99	16.2	228.6
WX3-14		1.69	0.4	4.9	0.79	0.67	1.76	0.39	0.93	0.97	16.84	226.5
WX3-15		1.42	0.41	3.09	0.78	0.24	2.55	0.68	0.99	0.98	16.16	214.4
XF1-8		1.37	0.32	7.96	0.74	0.19	2.79	0.2	0.95	0.96	16.49	196.6
XF1-9		1.41	0.38	3.22	0.74	0.21	1.93	0.69	0.94	0.94	16.07	192.5
ZJ 10-15		1.21	0.37	6.98	0.69	0.22	2.82	0.22	0.92	0.98	17.28	216.9
ZJ 10-14		1.10	0.14	5.77	0.72	0.24	2.32	0.38	0.96	0.96	14.39	171.5
ZJ 10-8		1.05	0.41	5.83	0.71	0.23	2.44	0.27	0.95	0.98	13.91	180.1
上沙溪庙组平均值		1.29	0.32	5.62	0.74	0.25	2.65	0.38	0.97	0.97	16.46	212.86
CX482-2	下沙溪庙组	1.39	0.18	13.95	0.76	0.21	2.83	0.17	0.99	0.97	16.91	245.1
CY609-9		1.15	0.23	3.07	0.74	0.19	2.62	0.4	0.92	0.98	16.67	232.9
WJ2-3		1.23	0.3	5.97	0.72	0.21	3.11	0.22	0.9	0.98	16.15	189.6
下沙溪庙组平均值		1.26	0.24	7.66	0.74	0.2	2.85	0.26	0.94	0.98	16.58	222.53

注:样品稀土元素单位为 10^{-6} ; $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N + Gd_N)^{1/2}$, $\delta Ce = Ce_N / (La_N + Pr_N)^{1/2}$, 据参考文献[2],下表N代表元素相对北美页岩(NASC)的标准化值。

整个沙溪庙组均表现为 V 元素弱富集, U 元素弱富集, Mo 元素亏损, 所以说明上、下沙溪庙组沉积环境可能不是还原环境或硫化环境, 而是氧化或弱氧化环境。

表3 研究区沙溪庙组 V、U、Mo 元素含量

Table 3 V, U, Mo element contents of Shaximiao Formation

	V/($\mu\text{g/g}$)	U/($\mu\text{g/g}$)	Mo/($\mu\text{g/g}$)
平均泥质岩	130	3.7	2.6
上沙溪庙组	140.4	4.2	0.9
下沙溪庙组	158.3	3.7	0.5

V/Cr、Ni/Co、U/Th 比值对沉积环境的判别效果较好^[40]。V、U、Ni、Th 等微量元素在炭质页岩及炭质泥岩等强吸附能力的岩石中会富集, 常导致高的 U/Th 比值^[41~43]。V、U 等元素还在生物细菌和还原环境中易于富集, 而 Co 和 Ni 等元素在氧化环境中相对富集, 因此常造成氧化环境中 V/Cr 和 Ni/Co 等的低比值, 在还原环境中 V/Cr 和 Ni/Co 等的高比值^[44~49]。一般认为样品的 (Cu + Mo) /Zn 比值与平均页岩的 (Cu + Mo) /Zn 比值对比, 比值高的为缺氧环境, 而比值低的则表示氧化环境^[50, 51]。判断标准为下表(表4)。

表4 氧化还原环境的微量元素判断标准

Table 4 Judgment parameters of trace elements of redox condition

环境指标	比值范围	氧化还原环境	上沙溪庙组	下沙溪庙组
V/Cr	>4.25	缺氧环境		
	2~4.25	贫氧环境		
	<2	氧化环境	1.29	1.26
Ni/Co	>7	缺氧环境		
	5~7	贫氧环境		
	<5	氧化环境	2.65	2.85
U/Th	>1.25	缺氧环境		
	0.75~1.25	贫氧环境		
	<0.75	氧化环境	0.25	0.2
(Cu + Mo) /Zn	高	缺氧环境		
	低	氧化环境	低	低

根据计算, 下沙溪庙组泥质岩的 V/Cr 比值介于 1.15 ~ 1.26 之间, 平均为 1.21; Ni/Co 比值介于 2.62 ~ 3.11 之间, 平均为 2.85; U/Th 比值介于 0.19 ~ 0.21 之间, 平均为 0.2。(Cu + Mo) /Zn 比值的平均值为 0.26, 低于平均页岩 (Cu + Mo) /Zn 比值 0.5。上沙溪庙组泥质岩的 V/Cr 比值介于 1.1 ~ 1.69 之间, 平均为 1.29; Ni/Co 比值介于 1.76 ~ 3.34 之间,

平均为 2.65; U/Th 比值介于 0.17 ~ 0.67 之间, 平均为 0.25。(Cu + Mo) /Zn 比值的平均值为 0.38, 低于平均页岩 (Cu + Mo) /Zn 比值 0.5(表2、表4)。根据以上计算可以看出上、下沙溪庙组 V/Cr、Ni/Co、U/Th 比值相似, 所以认为整个沙溪庙组沉积期总体上表现为氧化环境。

稀土元素中唯有 Ce、Eu 两个元素具有变价的性质, Ce 元素在氧化条件下, 易被氧化成四价而被铁锰等氧化物胶体吸附, 从而导致水体中 Ce 亏损; 在还原条件下随着铁锰等氧化物的溶解, 四价的 Ce 被还原成三价释放, 使得水体中 Ce 富集。Eu 元素在强还原环境下, 三价 Eu 被还原成二价 Eu^[25, 52~54]。通常将 δCe 和 δEu 异常作为沉积环境的氧化还原的指标, 当 δCe 和 $\delta\text{Eu} < 1$ 时, 表示亏损, 为氧化环境; 当 δCe 和 $\delta\text{Eu} > 1$ 时, 表示正常或过剩, 为还原环境^[55]。陈衍景等^[56]研究表明, 在缺氧的条件下, ΣREE 较低, 正 Eu 异常, La/Yb 较低; 而在氧化的条件下, ΣREE 高, 负 Eu 异常, La/Yb 高。根据计算研究区下沙溪庙组泥质岩 δCe 值介于 0.98 ~ 0.97, 平均值为 0.98, δEu 值介于 0.90 ~ 0.99 之间, 平均值为 0.94, 均为负异常。 ΣREE 值介于 189.6 ~ 232.9 $\mu\text{g/g}$ 之间, 平均值为 222.53 $\mu\text{g/g}$, 同北美页岩 ΣREE 值 173.21 相比属于富集, La/Yb 比值介于 16.15 ~ 16.91 之间, 平均值为 16.58, 同北美页岩 (La/Yb 比值为 10.32) 相比, 较高。所以综合 Ce、Eu 异常, La/Yb 比值及 ΣREE 值的判别, 认为下沙溪庙组沉积时为氧化环境。上沙溪庙组泥质岩 δCe 值介于 0.94 ~ 0.99 之间, 平均值为 0.97, δEu 值介于 0.92 ~ 1.01 之间, 平均值为 0.97, 为负异常。 ΣREE 值介于 171.5 ~ 249.2 $\mu\text{g/g}$ 之间, 平均值为 212.86 $\mu\text{g/g}$, 同北美页岩 ΣREE 值 173.21 相比属于富集, La/Yb 比值介于 13.91 ~ 18.18 之间, 平均值为 16.46, 同北美页岩 (La/Yb 比值为 10.32) 相比, 较高。所以综合 Ce、Eu 异常, La/Yb 比值及 ΣREE 值的判别, 认为上沙溪庙组沉积时为氧化环境。

微量元素和稀土元素的含量会受到诸如构造活动, 成岩后生变化等因素的影响, 所以在利用这些指标判别氧化还原环境的时候, 需要多项指标相互验证, 才可以提高可信度。本文采用受成岩作用影响较小的 V、U、Mo、V/Cr、Ni/Co、U/Th、(Cu + Mo) /Zn、 δCe 、 δEu 、 ΣREE 、La/Yb 等地球化学指标, 对研究区沙溪庙组沉积时期的氧化还原环境进行了判断, 结果认为整个沙溪庙组沉积期为氧化环境。

3.3 地球化学元素指示的古气候特征

曹珂等^[15]利用粘土矿物特征作为气候指标对四川盆地广元地区的古气候进行了详细的研究,认为四川盆地在中侏罗世早中期为以干冷为主的半干旱气候,中侏罗世晚期的一个很短的时间内变的相当干冷,晚侏罗世至早白垩世为暖湿气候,所以沙溪庙期为干冷气候。王权伟等^[16]利用孢粉组合认为,沙溪庙组总体属于亚热带半干旱—干旱气候区,由于叶肢介层的发育指示了干冷气候,所以认为沙溪庙组气候为早期的半干旱—干旱转为不干旱、凉,再到半干旱—干旱的气候特征。王红梅等^[17]研究了四川剑门关地区侏罗系至白垩系的分子化石,认为研究区在中侏罗世到早白垩世总体上是一种温暖潮湿的古气候环境。

有学者认为 Sr/Cu 比值可以指示湖盆中的古气候^[15,17],他认为 Sr/Cu 比值介于 1.3~5 之间为温湿气候,大于 5 为干热气候。研究区下沙溪庙组 Sr/Cu 比值介于 2.45~14.67 之间,其中 4 个样品的比值小于 5,6 个样品的比值大于 5,平均值为 7.29。上沙溪庙组 Sr/Cu 比值介于 3.09~24.98 之间,其中 9 个样品的比值小于 5,19 个样品的比值大于 5,平均值为 7.41(表 2)。根据以上计算可以得出整个沙溪庙组沉积期气候以干热为主,且自下沙溪庙组至上沙溪庙组气候逐渐变的更为干旱。因此,综合前人研究成果及研究区微量元素特征,本文认为下沙溪庙组沉积期整体表现为温暖干旱,至叶肢介层时期转变为潮湿、凉,此后上沙溪庙组沉积期又转变为类似于下沙溪庙沉积期的温暖干旱的气候环境,且干旱程度逐渐加强。

4 结论

本文通过对四川盆地中侏罗统沙溪庙组样品进行了详细的微量元素及稀土元素地球化学分析,根据不同特征微量元素比值及稀土元素特征对沉积物沉积时的古盐度、氧化还原环境及古气候进行详细的研究,得出以下几点结论:

(1) 根据对 Sr/Ba 微量元素比值及前人研究成果的综合分析,本文认为沙溪庙组沉积期由于大量河淡水输入,湖水为淡水。

(2) 根据 V、U、Mo、V/Cr、Ni/Co、U/Th、(Cu + Mo)/Zn、V/(V + Ni) 微量元素特征值及比值,以及 δCe 、 δEu 、 ΣREE 、La/Yb 稀土元素特征值及比值等多种判断标准,本文认为整个沙溪庙组沉积时期湖泊底

层水体总体上为中等分层的含氧环境。

(3) 计算 Sr/Cu 微量元素比值及结合前人研究成果,认为下沙溪庙组沉积期整体表现为温暖干旱,局部时期转凉,此后上沙溪庙组沉积期又转变为类似于下沙溪庙沉积期的温暖干旱的气候环境,且干旱程度逐渐加强。

参考文献 (References)

- 1 邓宏文,钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社,1993: 4-28 [Deng Hongwen, Qian Kai. Analysis on Sedimentary Geochemistry and Environment [M]. Lanzhou: Gansu Science Technology Press, 1993: 4-28]
- 2 刘岫峰. 沉积岩实验室研究方法[M]. 北京: 地质出版社,1991: 206-212 [Liu Xiufeng. Laboratorial methods of Sedimentary Rock [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 206-212]
- 3 程岳宏,于兴河,韩宝清,等. 东濮凹陷北部古近系沙三段地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质,2010,32(2): 357-366 [Cheng Yuehong, Yu Xinghe, Han Baoqing, et al. Geochemical characteristics of the 3rd Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Depression and their geological implications [J]. Geology in China, 2010, 32(2): 357-366]
- 4 刘刚,周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质,2007,29(3): 307-314 [Liu Gang, Zhou Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qianjiang Formation the Jianghan Basin as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-314]
- 5 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, Cheng 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]
- 6 倪志耀,莫怀毅,刘援朝. 冕宁前寒武纪沉积岩的铕、铈异常特征及成因解释[J]. 四川地质学报,1998,18(4): 259-265 [Ni Zhiyao, Mo Huaiyi, Liu Yuanchao. Eu and Ce anomalies and genetic explanation for the Precambrian sedimentary rocks in Mianning Area, Sichuan [J]. Acta Geologica Sichuan, 1998, 18(4): 259-265]
- 7 刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社,1993: 17-117 [Liu Shugen. The Formation and Evolution of Longmenshan Thrust Zone and Western Sichuan China [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology, 1993: 17-117]
- 8 刘树根,罗志立,戴苏兰,等. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. 地质学报,1995,69(3): 205-213 [Liu Shugen, Luo Zhili, Dai Sulan, et al. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of western Sichuan foreland basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69(3): 205-213]

- 9 刘和甫,梁慧社,蔡立国,等. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 1994, 68(2): 100-117 [Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Ligu, *et al.* Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(2): 100-117]
- 10 雍自全,刘庆松,李倩. 川西前路盆地的发展演化、地层充填及其对油气成藏的意义[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 26-30 [Yong Ziquan, Liu Qingsong, Li Qian. Evolution and sediment filling of western Sichuan foreland basin and their significance of hydrocarbon accumulation [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(2): 26-30]
- 11 郭正吾,邓康龄,韩永辉,等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-275 [Guo Zhengwu, Deng Kanglin, Han Yonghui, *et al.* Formation and Development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-275]
- 12 马永生,陈洪德,王国力,等. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 379-476 [Ma Yongsheng, Cheng Hongde, Wang Guoli, *et al.* Sequence Stratigraphy and Ancient Geography in Southern China [M]. Beijing: Science Press, 2009: 379-476]
- 13 王亮国,余福林,邓康龄,等. 川西坳陷侏罗系沉积环境[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(6): 13-16 [Wang Lianguo, Yu Fulin, Deng Kanglin, *et al.* The sedimentary environment of Jurassic depression in West Sichuan [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2001, 8(6): 13-16]
- 14 胡晓强,陈洪德,纪相田,等. 川西前陆盆地侏罗系三角洲沉积体系与沉积模式[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 226-237 [Hu Xiaoqiang, Cheng Hongde, Ji Xiangtian, *et al.* The Jurassic delta deposit system tract and sedimentation model in the West Sichuan Foreland Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(3): 226-237]
- 15 曹珂,李祥辉,王成善,等. 四川广元地区中侏罗世—早白垩世粘土矿物与古气候[J]. 矿物岩石, 2010, 30(1): 41-46 [Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chengshan, *et al.* Clay minerals of the middle Jurassic-Lower Cretaceous in the Guangyuan Area, Northern Sichuan: Implications to paleoclimate [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 2010, 30(1): 41-46]
- 16 王全伟,阚泽忠,刘啸虎,等. 四川中生代陆相盆地孢粉组合所反映的古植被与古气候特征[J]. 四川地质学报, 2008, 28(2): 89-95 [Wang Quanwei, Kan Zezhong, Liu Xiaohu, *et al.* The Mesozoic sporopollen assemblage in the Sichuan Basin and its significance to paleovegetation and paleoclimate [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2008, 28(2): 89-95]
- 17 王红梅,刘育燕,刘志远. 四川剑门关侏罗—白垩系红层分子化石的古环境和古气候意义[J]. 地球科学, 2001, 26(3): 229-234 [Wang Hongmei, Liu Yuyan, Liu Zhiyuan. Molecular fossils as indicators for paleoenvironment and paleoclimate from red clastic rocks of middle Jurassic-early Cretaceous in Jianmenguan, Sichuan Basin of China [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(3): 229-234]
- 18 黄其胜. 四川盆地北缘达县—开县一带早侏罗世珍珠冲植物群及其古环境[J]. 地球科学, 2001, 26(3): 221-228 [Huang Qisheng. Early Jurassic flora and paleoenvironment in Daxian and Kaixian counties North Border of Sichuan Basin, China [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(3): 221-228]
- 19 胡晓强,陈洪德,纪相田,等. 川西前陆盆地侏罗系层序地层[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(2): 16-19 [Hu Xiaoqiang, Cheng Hongde, Ji Xiangtian, *et al.* Jurassic sequence stratigraphy in the western Sichuan foreland basin, China [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(2): 16-19]
- 20 杨国臣,于炳松,陈建强,等. 川西前陆盆地上侏罗统一白垩系泥质岩稀土元素地球化学[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 140-150 [Yang Guochen, Yu Bingsong, Cheng Jianqiang, *et al.* Geochemical research on rare earth elements of argillaceous rocks of upper-Jurassic and Cretaceous in the Western Sichuan foreland basin [J]. *Geoscience*, 2010, 24(1): 140-150]
- 21 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-26 [Tong Chongguang. Evolution and Oil and Gas Accumulation in Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-26]
- 22 王永标,徐海军. 四川盆地侏罗纪至早白垩世沉积旋回与构造隆升的关系[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2001, 26(3): 241-246 [Wang Yongbiao, Xu Haijun. Relations between evolution of sedimentary cycles and tectonic uplift around Sichuan Basin from Jurassic to Early Cretaceous [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*. 2001. 26(3): 241-246]
- 23 四川省地质局第二区域地质测量队. 1:20万绵阳幅地质图[M]. 1976 [The Second Regional Geological Survey Team Geological Bureau of Sichuan Province. 1:200000 Mianyang Geological Map [M]. 1976]
- 24 马立元,周总瑛. 川西坳陷中段上三叠统须家河组天然气资源潜力分析[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(5): 730-737 [Ma Liyuan, Zhou Zongying. Analysis of natural gas resource potential for the upper Tertiary Xujiahe Formation in the middle part of West Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(5): 730-737]
- 25 Shields G, Stille P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as paleoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of Cambrian phosphorites [J]. *Chemical Geology*, 2001, 175: 29-48
- 26 Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust [J]. *Bulletin of Geological Society of America Bulletin*, 1961, 72: 175-192
- 27 杨锐. 微量元素硼的意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(3): 91-96 [Yang Rui. Environmental significance of trace element boron [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993, 13(3): 91-96]
- 28 王爱华. 不同形态锶钡比的沉积环境判别效果比较[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 168-173 [Wang Aihua. Discriminant effect of sedimentary environment by the Sr/Ba ratio of different existing forms [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(4): 168-173]
- 29 郑荣才,柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25 [Zheng Rongcai, Liu Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 20-25]

- 30 文华国,郑荣才,唐飞,等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 114-120 [Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Tang Fei, *et al.* Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos basin [J]. Journal of Mineral Petrology, 2008, 28(1): 114-120]
- 31 曲星武,王金城. 用锶钡比研究沉积环境的初步探讨[J]. 煤田地质与勘探, 1979, 1: 15-21 [Qu Xingwu, Wang Jincheng. Analysis on using Sr/Ba value to study sedimentary environments [J]. Coal Geology & Exploration, 1979, 1: 15-21]
- 32 赵一阳,鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994 [Zhao Yiyang, Yan Mingcai. Sedimentary Geochemistry in China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1994]
- 33 Breit G N, Wanty R B. Vanadium accumulation in carbonaceous rocks: a review of geochemical controls during deposition and diagenesis [J]. Chemical Geology, 1991, 91: 83-97
- 34 Wanty R B, Goldhaber R. Thermodynamics and kinetics of reactions involving vanadium in natural systems: accumulation of vanadium in sedimentary rock [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 171-183
- 35 Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, *et al.* Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. Chemical Geology, 2006, 232: 12-32
- 36 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 [J]. Chemical Geology, 1992, 99: 65-82
- 37 常华进,储雪蕾,冯连君,等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91-99 [Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, *et al.* Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies [J]. Geological Review, 2009, 55(1): 91-99]
- 38 Algeo T J, Maynard J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. Chemical Geology, 2004, 206: 289-318
- 39 Tribouillard N, Riboulleau A, Lyons T, *et al.* Enhanced trapping of molybdenum by sulfurized organic matter of marine origin as recorded by various Mesozoic formations [J]. Chemical Geology, 2004b, 213: 385-401
- 40 Jones B J, Manning A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstone [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1994, 111: 111-129
- 41 Adams J A S, Weaver C E. Thorium to uranium ratios as indicators of sedimentary processes: Examples of the concept of geochemical facies [J]. Petroleum Geology Bulletin, 1958, 42: 387-430
- 42 Rogers J J W, Adams J A S. Abundances in rock forming minerals (I), uranium minerals (II) [M] // Wedepohl K H, ed. The Handbook of Geochemistry, Sect. 92-D. Berlin: Springer, 1969, 92-D1-92-D2
- 43 Wignall P B, Myers K J. Interpreting the benthic oxygen levels in mudrocks: a new approach [J]. Geology, 1988, 16: 452-455
- 44 Ernst T W. Geological Facies Analysis [M]. Amsterdam: Elsevier, 1970: 152
- 45 Krecji-Graf K. Geochemical Facies of Sediments [M]. Soil Science, 1975: 20-23
- 46 Raiswell R, Plant J. The incorporation of trace elements into pyrite during diagenesis of black shales, Yorkshire, England [J]. Economic Geology, 1980, 75: 684-699
- 47 Patterson J H, Ramsden A R, Dale L S, *et al.* Geochemistry and mineralogical residences of trace elements in oil shales from Julia Creek [J]. Chemical Geology, 1986, 55: 1-16
- 48 Dill H. Metallogenesis of early Palaeozoic graptolite shales from the Graefenthal Horst [J]. Economic Geology, 1986, 81: 889-903
- 49 Dill H, Teschner M, Wehner H. Petrography inorganic and organic geochemistry of Lower Permian carbonaceous fan sequences ("Brand-schiefer Series") -Federal Republic of Germany: constraints to their palaeogeography and assessment of their source rock potential [J]. Chemical Geology, 1988, 67: 307-325
- 50 Hallberg R O. Geochemical Method for Investigation of Palaeoredox Conditions in Sediments [M]. Ambio, Special Republic, 1976, A No. 4: 139-147
- 51 Hallberg R O. Diagenetic and environmental effects on heavy-metal distribution in sediments: A hypothesis with an illustration from the Baltic Sea [M] // Fanning K A, Manheim F T, eds. The Dynamic Environment of the Ocean Floor. Lexington Books, Lexington, Mass, 1982: 305-316
- 52 Elderfield H, Greaves M J. The rare earth elements in seawater [J]. Nature, 1982, 296: 214-219
- 53 Elderfield H, Pagett M. REE in ichthyoliths: variations with redox conditions and depositional environment [J]. The Science of the Total-Environment, 1986, 49: 175-197
- 54 Yang J, Sun W, Wang Z, *et al.* Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: Evidence from the oxygenation of Neoproterozoic seawater? [J]. Precambrian Research, 1999, 93: 215-233
- 55 Sholkovita E R, Schneider D L. Cerium redox cycles and rare earth elements in the Sargasso Sea [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55: 2737-2743
- 56 陈衍景,邓建,胡桂兴. 环境对沉积物微量元素含量和配分型式的制约[J]. 地质地球化学, 1996, 18(3): 97-105 [Cheng Yanjing, Deng Jian, Hu Guixing. Restriction of environment to the abundance and pattern of trace elements in sediments [J]. Geology Geochemistry, 1996, 18(3): 97-105]
- 57 莱尔曼主编,王苏民等译. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 王苏民等译,北京: 地质出版社, 1989 [Lerman A. The Lacustrine Chemistry' Geology and Physics [M]. Translated by Wang Sumin, *et al.* Beijing: Geological Publishing House, 1989]

Geochemical Characteristics and Environmental Implications of Middle Jurassic Shaximiao Formation , Western Margin of Sichuan Basin

QIAN Li-jun CHEN Hong-de LIN Liang-biao XU Sheng-lin OU Li-hua

(Institute of Sedimentary Geology , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059)

Abstract: Trace elements and REE of sedimentary rocks contain abundant information of geology. Having a high sensitivity on hydrological changes of sedimentary environment , trace elements and REE can be used as an effective method on the study of paleoclimate and paleoenvironment during deposition period. Choosing the trace elements and REE measured value of 17 samples of middle Jurassic Shaximiao Formation of western margin of Sichuan basin. Results indicate that , in the study area , both the Sr/Ba ratios of the upper and lower Shaximiao Formation are less than 1 , which illustrate that there was a fresh water environment during deposition of Shaximiao Formation. The characteristic values and ratios of trace elements and REE such as V , U , Mo , V/Cr , Ni/Co , U/Th , (Cu + Mo) /Zn , V/(V + Ni) , δCe , δEu , $\sum\text{REE}$, La/Yb , suggest that the bottom water of the lake was moderate oxidation environment during the whole time Shaximiao Formation deposition. According to the Sr/Cu ratios and the research findings before , we suggest that there paleoclimate was warm and arid with cool interphases during the whole time of lower Shaximiao Formation , and after then it turned to worm and aridity again during the upper Shaximiao period , which is as the lower Shaximiao Formation , and the aridity strengthened gradually.

key words: Sichuan Basin; Middle Jurassic; Shaximiao Formation; trace element; REE; paleoclimate; paleoenvironment