

杨海欧, 王长城, 李文杰, 等. 基于微量元素比值分析方法研究川东南地区小河坝组沉积环境和古气候环境[J]. 岩矿测试, 2017, 36(3): 289 - 296.

YANG Hai-ou, WANG Chang-cheng, LI Wen-jie, et al. Research on the Sedimentary and Paleoclimate Environment of the Xiaoheba Formation in Southeastern Sichuan Based on the Trace Elements Ratio Method [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(3): 289 - 296. [DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201607200103]

基于微量元素比值分析方法研究川东南地区小河坝组沉积环境和古气候环境

杨海欧¹, 王长城^{1,2*}, 李文杰¹, 董华¹, 龚晓星¹

(1. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 川东南地区下志留统小河坝组砂岩具有较好的生储盖组合条件, 油气地质条件优越, 但对其沉积环境为陆相还是海相沉积三角洲的厘定尚不明确。本文针对川东南地区小河坝组亟需解决的沉积环境问题, 系统采集了该地区9条典型剖面的74个样品, 通过微量元素比值分析方法分析其元素组成, 并结合沉积构造特征分析其沉积环境及古气候环境。利用X射线荧光光谱法测试了能判别海陆相沉积环境的Sr、Ba、Mn、Cu等微量元素。结果显示, Sr/Ba平均值为0.2790, 最大值为2.31, Mn/Fe值为0.0093~0.0778, Sr/Ca值为0.0005~0.0414, 表现为三角洲淡水沉积特征; Sr/Ba平均值小于1, Sr/Cu平均值为4.8758, 8.1%样品的Sr/Cu值大于10, 总体上反映了小河坝组沉积环境为湿润潮湿的古气候环境。

关键词: 微量元素; 小河坝组; 沉积环境; 古气候; X射线荧光光谱法

中图分类号: O657.34; X142

文献标识码: A

由于沉积岩的形成与沉积环境特征有着千丝万缕的关系, 因而沉积环境的研究一直以来都是沉积学研究的重要内容。近年来, 随着不同学科之间科学理论的相互渗透, 测试分析仪器的不断进步与完善, 能够识别沉积环境的研究方法已经逐步多样化和精确化。通过成岩作用时期元素的迁移、聚集分布规律来判别沉积环境, 也逐渐成为沉积学研究的重要手段之一。

川东南小河坝组下伏地层发育一套龙马溪组页岩, 顶部发育韩家店组泥页岩, 形成了良好的生储盖组合^[1], 研究小河坝组的沉积环境对指导油气勘探具有重要意义。王国茹等^[2]利用赤铁矿通过稀土元素研究表明川东南小河坝组部分区域为深水还原环境; 张欣平等^[3]通过痕迹化石种类研究认为小河

坝组湘西北区域是浅海相沉积环境; 王正和等^[4]通过野外岩性露头研究认为小河坝组属于低河流能量、欠充沛物源且以悬浮搬运为主的低建设性浅水三角洲沉积。前人的研究多采用了传统的地质地球化学分析方法, 分析结果多为定性分析, 难以实现定量研究。

X射线荧光光谱法(XRF)被广泛用于许多行业, 已成为理化检测、野外现场分析和过程控制分析等研究领域的重要工具。在近七十年发展历程中, XRF法可分析范围包括原子序数 $Z \geq 3$ 的所有元素, 对许多元素可测到 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ g/g, 测量精度高, 强度测量的再现性好, 便于进行无损分析^[5-9]。前人研究表明, XRF法与常规化学分析方法的实验结果相比, 相对误差小于3%^[10]。孔芹等^[9]和高拉

收稿日期: 2016-07-20; 修回日期: 2017-01-22; 接受日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41204091)

作者简介: 杨海欧, 在读硕士研究生, 主要从事储层地质的研究。E-mail: 1186078543@qq.com。

通讯作者: 王长城, 博士, 教授, 主要从事储层地质及储层预测工作的研究。E-mail: wcc-126@163.com。

凡等^[10]利用 XRF 法在四川盆地须家河组沉积环境识别的研究中取得了较好的成果,并且证明该方法与常规化学分析方法相比有诸多优势。本文应用 XRF 法测量川东南下志留统小河坝组多种可指示沉积环境的微量元素比值,从微量元素的角度半定量地明确了小河坝组的沉积环境特征类型,并研究了该区的古气候环境,对于推动沉积学研究的发展和完善具有较重要的作用。

1 实验部分

1.1 研究区区域地质概况

小河坝组在川东南主要发育海陆过渡体系,以雪峰山隆起为物源注入,发育三角洲入海^[1]。岩石学特征分析表明,邻近江南雪峰的黔江、沿河、秀山、印江等地,为一套粉砂岩、页岩夹细粒石英砂岩。研究区主要发育水平层理、平行层理,此外波痕构造十分发育。平行层理主要见于砂岩中,在外貌上与水平层理极为相似,形成于强水动力条件,反映急流高

能环境,如分流河道、滨岸和砂坝等环境中,主要出现于细砂岩中。

1.2 数据采集

本文分别在重庆、湖南的小河坝组典型剖面采集了 74 个样品,采样点分布位置如图 1 所示。其中,重庆武隆黄草场 9 个样品,重庆武隆浩口 12 个样品,重庆南川金山镇 5 个样品,重庆金竹 3 个样品,重庆秀山溶溪 15 个样品,重庆石柱双流坝 12 个样品,重庆南川三泉 11 个样品,重庆石柱漆辽 2 个样品,湖南花垣卡棚 5 个样品。样品类型主要为粉砂岩。为了使样品的测试结果更加准确和进行元素比值分析时可以排除人为造成的误差,野外采集的样品选择露头新鲜,未经风化的志留系小河坝组砂岩,并且每个样品质量约 0.5 ~ 1 kg,以便磨成足够粒径的粉末进行压片实验。

1.3 实验方法

实验分为三个重要步骤:①碎样。采用成都理工大学能源学院实验室的 GJ-1 密封式化验制样粉

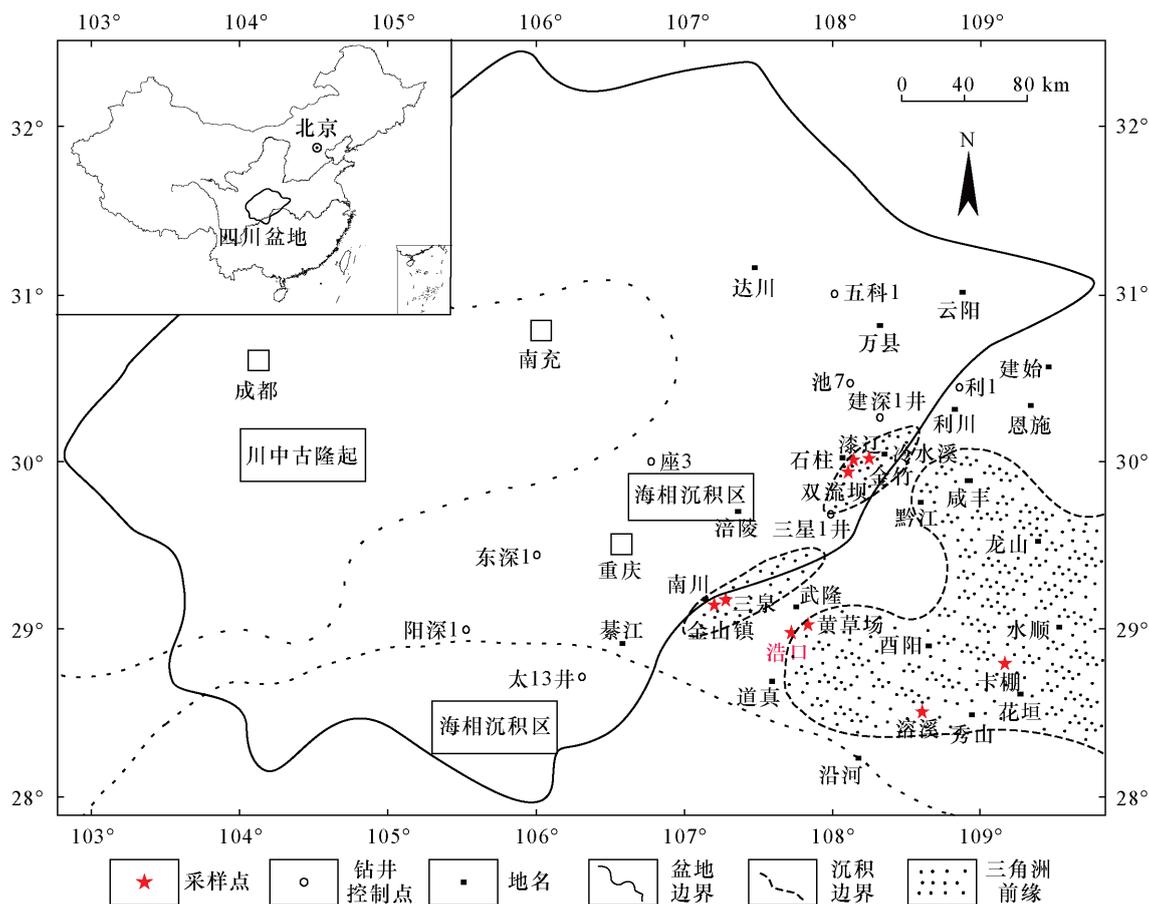


图 1 采样点分布位置特征图(据朱志军等^[1]改编)

Fig. 1 The distribution location of sampling point (Modified after Zhu, et al^[1])

碎机(鹤壁市华泰仪器仪表有限公司),将样品粉碎至粒度小于 $74\ \mu\text{m}$ (200 目),每个样品耗时约 3 ~ 5 min。为防止样品间的污染,每粉碎一个样品,研钵均用酒精冲洗并蒸干。②压片。压片之前将样品在 $105\ ^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干 90 min,以保证样品中的自由水全部排除。样品冷却后采用 YY-600 粉末压片机(南京和奥自动化科技有限公司),以硼酸作固体黏结剂,将样品压成外径 40 mm、内径 35 mm、高 5 mm 的硼饼,设置的条件为制样压力 30 t,保压 30 s。③测试分析。采用 XRF-1800 顺序扫描式 X 射线荧光光谱仪(日本岛津公司),靶材 Rh,功率 4 kW,每个样品测试时间约 8 ~ 10 min。采用表 1 所示的各元素的主要测量参数测定 SiO_2 、CaO、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、MgO、MnO、BaO、SrO 等。

表 1 元素 XRF 分析测试条件

Table 1 Analytical conditions of the elements by XRF

元素	晶体	检测器	测量角度 ($^\circ$)	测量时间 (s)	电压 (kV)	电流 (mA)	脉冲高度调节	
							分析 上限	分析 下限
Ti-U K,Ca,	LiF	SC	10~90	240	40	95	25	75
Sn-Cs Cl	LiF	FPC	90~140	150	40	95	25	75
	Ge	FPC	90~96	18	40	95	25	75
S	Ge	FPC	108~114	18	40	95	25	75
P	Ge	FPC	138~144	18	40	95	25	75
Si	PET	FPC	106~112	18	40	95	25	75
Al	PET	FPC	142~148	18	40	95	25	75
Mg	TAP	FPC	42~48	18	40	95	25	75
Na	TAP	FPC	52~58	18	40	95	25	75

1.4 谱线重叠干扰和基体效应的校正

由于 XRF 的定性分析和定量分析会受到很多外界因素的影响,因此为了提高分析结果的准确性和精确性,在分析过程中尽可能减小甚至排除包括谱线干扰、环境气体干扰、基体的影响等干扰因素^[6]。每次实验前会先对实验仪器利用真空泵将腔体内的空气经由分析腔排出,使整个实验过程确保真空环境,确保无环境气体干扰。

为了降低谱线重叠干扰和基体效应,使用岛津公司软件提供的校正曲线和基体校准一体的回归方法 Lachance-Trail method 进行谱线重叠干扰校正

和基体效应校正。校正的数学公式(1)为:

$$w_i = (b \times I + c) \times (1 + \sum_{j \neq i} a_j \times w_j) - \sum_{j \neq i} L_j \times w_j \quad (1)$$

式中: w_j 为基体元素 j 测定结果; a_j 为影响吸收系数; L_j 为重叠影响因素; w_i 为被校正元素 i 的测定结果; I 为被校正元素 i 的 X 射线强度; b 、 c 为标准曲线常数。 b 、 c 由回归程序经多元回归计算得到,并保存在组条件中。若光谱仪的稳定性好,所制作的校准曲线可长期使用。

1.5 方法检出限

方法检出限采用校正曲线法计算,用多个低含量试样校正曲线($w_i = aI + b$),算出含量为零($w = 0$)时的 X 射线荧光强度($I_0 = -b/a$)。根据 X 射线荧光光谱分析检出限(LOD)的表达式:

$$\text{LOD} = 3S_0/m_i = \frac{3}{m_i} \sqrt{\frac{I_0}{t}} \quad (2)$$

式中:LOD 为检出限($\mu\text{g/g}$); m_i 为分析元素灵敏度,即校正曲线斜率(a)的倒数, $m_i = 1/a$ [$\text{kcps}/(\mu\text{g/g})$]; I_0 为零含量时计数率($I_0 = -b/a$),其标准偏差 $S_0 = \sqrt{\frac{I_0}{t}}$, t 为元素分析线测量时间(s)。

各成分的检出限为: SiO_2 570 $\mu\text{g/g}$, Al_2O_3 30 $\mu\text{g/g}$, Fe_2O_3 3 $\mu\text{g/g}$, CaO 380 $\mu\text{g/g}$, MgO 10 $\mu\text{g/g}$, K_2O 3 $\mu\text{g/g}$, Na_2O 70 $\mu\text{g/g}$ 。

1.6 方法精密度和准确度

按实验方法制备样品,在仪器工作条件下对样品 HCC-SIX-1 进行 12 次分析,计算各测定成分的相对标准偏差为 0.13% ~ 1.07%,表明本方法的精密度好。

为了验证 XRF 压片法实验结果的准确性,将该法与常规化学分析方法开展对比实验,对 74 个样品中选择的 5 个样品进行了常规测试分析,结果见表 2。从表 2 可以看出:两种分析方法的实验结果比较吻合。根据我国 1994 年开始实施的地质矿产实验室测试质量管理规范,各主要化学成分的质量分数均在误差范围内,这说明本实验所采用的 XRF 压片法的准确度较高,结果是可靠的,能够满足研究要求。

表2 XRF法与化学分析法结果比较

Table 2 Comparison of analytical results between XRF and chemical methods

样品	分析方法	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MnO (%)	BaO (%)	SrO (%)
HCC-S1X-2	压片法	78.20	13.30	3.04	3.15	0.19	0.07	0.02
	化学法	78.15	13.20	3.02	3.12	0.17	0.07	0.02
HK-S1X-4	压片法	61.8023	16.5877	4.8052	7.4275	0.0950	0.0706	0.0383
	化学法	61.7044	16.5426	4.7512	7.4177	0.0807	0.0655	0.0267
JZ-S1X-03	压片法	70.2663	17.1618	4.0065	0.3753	0.0947	0.0802	0.0059
	化学法	70.2431	17.1446	4.0089	0.3917	0.0917	0.0601	0.0031
KP-S1X-3	压片法	72.0475	18.7829	4.7761	0.3927	0.0959	0.0426	0.0053
	化学法	72.0876	18.7347	4.7226	0.3911	0.0853	0.0436	0.0051
SLB-S1X-9	压片法	71.6791	16.2985	3.6895	0.2511	0.0311	0.0976	0.0058
	化学法	71.6603	16.2687	3.6367	0.2412	0.0304	0.0964	0.0053

注: HCC代表重庆武隆黄草场, HK代表重庆武隆浩口, JZ代表重庆石柱金竹, KP代表湖南花垣卡棚, SLB代表石柱双流坝。

2 结果与讨论

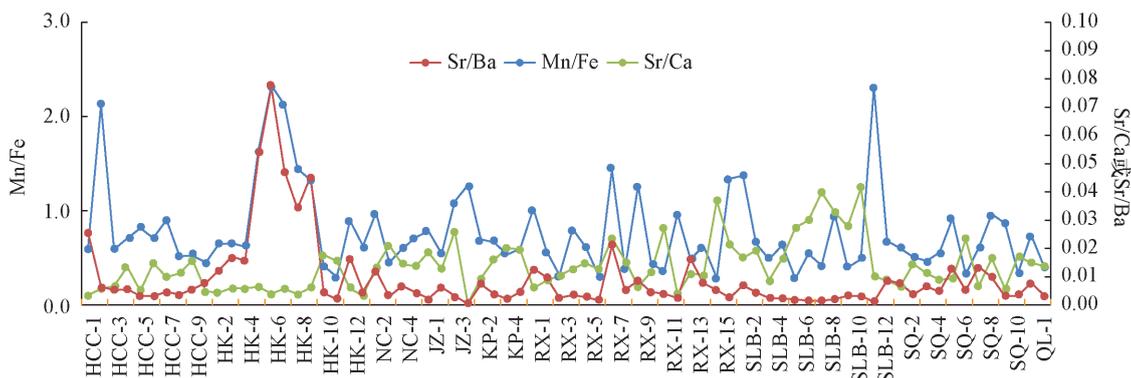
2.1 研究区沉积环境的识别

化学元素比值具有指相标志的意义, 近年来更加受到重视^[11]。根据元素含量比值可以消除单个元素因素, 并且利用其富集程度可以揭示沉积环境的关系, 因此特征元素比值可以更有效地提供沉积作用和沉积环境的演化信息^[12]。也有学者提出特征微量元素比值能够反映当时的沉积环境^[13-17]。因此本研究采用元素比值分析反演当时的沉积地质环境背景是具有理论基础的。

由于川东南地区与四川盆地的整体地质环境相似, 本文选取了前人利用微量元素比值分析研究四川盆地须家河组的标准: 对于 Sr/Ba 值, 淡水沉积物小于 0.6, 海陆过渡环境介于 0.6~1 之间, 海相沉积环境大于 1; 对于 Mn/Fe 值, 淡水沉积物小于 0.2, 海相沉积环境大于 0.2; 对于 Sr/Ca 值, 淡水沉积物低于

0.2, 海相沉积环境大于 0.2^[10]。根据 XRF 测得的数据来进行小河坝组元素比值分析。图 2 显示了所有样品元素比值变化特征, 表明浩口样品的整体 Mn/Fe 值、Sr/Ba 值有明显高值特征, 其余样品的元素比值均呈较稳定的变化趋势。Sr/Ca 值的整体趋势变化较小, 呈稳定分布。

小河坝组不同采样点样品利用 XRF 法测试结果如表 3 所示。不同剖面小河坝组样品的 Sr/Ba 值、Mn/Fe 值和 Sr/Ca 值的平均值符合三角洲淡水沉积特征。测定结果表明, 研究区样品的 Sr/Ba 值平均为 0.2790, 最大值为 2.31, 浩口样品的 Sr/Ba 平均值高于其余采样点, 有 5 个样品显示为海相沉积, 占总样品数的 6.8%, 说明浩口的沉积相已有部分三角洲入海, 从图 1 的沉积相分布位置图也可以看出该特征。研究区样品的 Mn/Fe 值介于 0.0093~0.0778 之间, 小于 0.2, 且浩口样品的 Mn/Fe 值与其



HCC代表重庆武隆黄草场, HK代表重庆武隆浩口, NC代表重庆南川金山镇, JZ代表重庆石柱金竹, KP代表湖南花垣卡棚, RX代表重庆秀山溶溪, SLB代表石柱双流坝, SQ代表重庆南川三泉, QL代表重庆石柱漆辽。

图2 不同样品的微量元素比值

Fig. 2 Ratios of trace elements for different samples

余采样点的 Mn/Fe 值差异较小,显示其为淡水沉积特征。研究区样品的 Sr/Ca 值介于 0.0005 ~ 0.0414 之间,小于 0.2,整体显示为淡水沉积特征。研究区元素比值横向分析可发现,由南东向北西方向的微量元素比值具有整体增大趋势,说明越往北西方向沉积环境更加靠近海相沉积,主要是指浩口一带,该变化趋势结果与前人从重矿物角度分析的结果相吻合^[1]。

表3 不同采样点元素比值平均值数据

Table 3 Data of average trace element ratios for different sampling point

采样地点	Mn/Fe	Sr/Ba	Sr/Ca	Sr/Cu
黄草场	0.027806	0.211277	0.00959	3.726602
浩口	0.035684	0.82998	0.00722	14.69682
金山镇	0.022522	0.187635	0.013203	6.761095
金竹	0.027013	0.118283	0.019193	1.542298
卡棚	0.025147	0.109539	0.013158	0.57519
溶溪	0.022036	0.216467	0.014179	2.711468
双流坝	0.027497	0.083117	0.024333	1.852628
三泉	0.020757	0.215158	0.011712	4.01708
漆辽	0.01907	0.167818	0.014374	2.81459

2.2 研究区古气候分析

碎屑岩沉积成岩的过程中,其微量元素含量与周围的古环境、古气候、物理化学条件具有十分紧密的关系,其沉积时期的古气候环境对元素的分布影响极大,根据元素的比值特征推测当时的沉积环境古气候特征具有十分可行的理论依据^[18-22]。沉积物中的 Sr/Ba 值较低,表明其沉积时期水体盐度较低,亦可指示其温暖湿润的古气候环境特征^[12]。Sr/Cu 值对古气候的变化也很敏感,通常 Sr/Cu 值介于 1 ~ 10 之间指示温湿气候,而 Sr/Cu 值大于 10 指示干热气候^[10,15],高值也可指示其水体盐度较高^[15]。

利用 Sr/Ba 值定性分析研究区的沉积古气候特征(图3),结果表明除浩口整体的 Sr/Ba 值较高,其余采样点的 Sr/Ba 值较低,符合温湿气候沉积特征。黄草场 9 个样品中, Sr/Cu 值均小于 10, 平均值为 3.7266;浩口 12 个样品中, Sr/Cu 值有 6 个大于 10, 平均值为 14.6968;金山镇 5 个样品中, Sr/Cu 值有 1 个大于 10, 平均值为 6.7611;金竹 3 个样品中, Sr/Cu 值全部小于 10, 平均值为 1.5423;在卡棚 5 个样品中, Sr/Cu 值全部小于 10, 平均值为 0.5752;溶溪 15 个样品中, Sr/Cu 值均小于 10, 平均值为 2.7115;双流坝 12 个样品中, Sr/Cu 值全部小于 10, 平均值为 1.8527;三泉 11 个样品中, Sr/Cu 值均小

于 10, 平均值为 4.0171;漆辽 2 个样品中, Sr/Cu 值均小于 10, 平均值为 2.8146。这 9 条剖面共有 74 个样品, Sr/Cu 平均值为 4.8758, 有 7 个样品 Sr/Cu 值大于 10, 仅占总样品数的 8.1%。该结果表明小河坝组总体上具有湿润潮湿的沉积古气候特征。

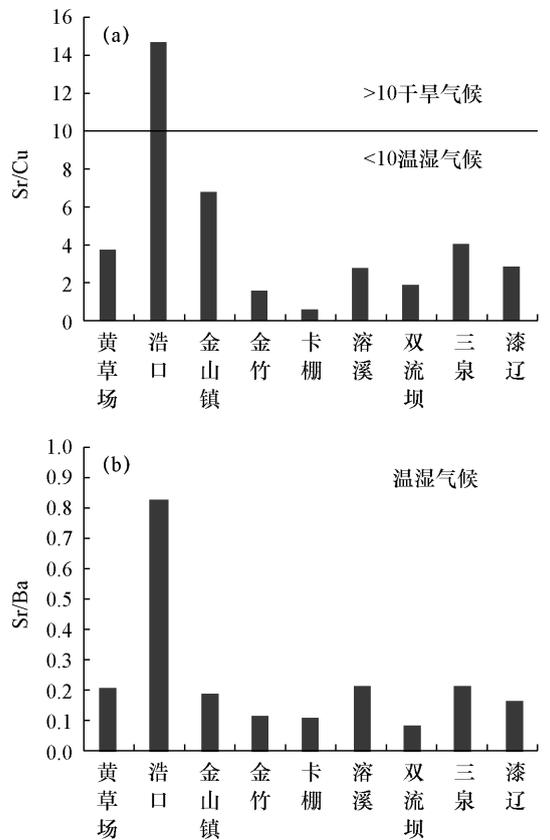


图3 微量元素古气候比值分析

Fig. 3 Analysis of trace elements in the ancient climate

3 结论

XRF 法可以实现沉积环境的半定量判别,这对于沉积环境的研究具有一定的推动作用。本文依据 XRF 法对来自川东南地区下志留统小河坝组的 74 个样品进行了元素比值分析,建立的研究方法可操作性、可重复性强,结果表明小河坝组浩口剖面样品与其他剖面样品的 Sr/Ba 值整体有明显变大趋势,但其平均值结果仍显示为海陆过渡沉积环境, Mn/Fe 值和 Sr/Ca 值显示小河坝组为三角洲淡水沉积类型。利用 Sr/Ba 值、Sr/Cu 值判别出小河坝组的古沉积环境气候为温湿类型。

许多学者利用微量元素比值分析方法识别沉积环境与古气候环境,该方法要结合研究区的沉积地质背景以及演化背景,一般而言都选取砂岩进行研

究,如果是碳酸盐岩沉积环境则应该考虑碳的烧失量,否则研究结果会有偏差。不同类型元素比值的判别标准因地制宜,不可一概而论,但基本都符合常规的判别范围。本研究从另一个角度判别出小河坝组浩口的沉积环境古气候特征与其他剖面的沉积特征具有明显差异,该研究结果对于推动小河坝组沉积相研究的完善具有一定的指导意义。

4 参考文献

- [1] 朱志军,陈洪德. 川东南地区早志留世晚期沉积特征及沉积模式分析[J]. 中国地质,2012,39(1):64-76.
Zhu Z J, Chen H D. An analysis of sedimentary characteristics and model of Silurian Xiaoheba Formation in southeastern Sichuan Province[J]. Geology in China, 2012,39(1):64-76.
- [2] 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]. 成都理工大学学报,2011,38(1):7-14.
Wang G R, Chen H D, Zhu Z J, et al. The characteristics and geological implications of rare earth elements in sandstone of lower Silurian Xiaoheba Formation in the southeastern Sichuan—western Hunan [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2011,38(1):7-14.
- [3] 张欣平,张纯臣,王大任. 湘西北地区志留系泥盆系的痕迹化石[J]. 湖南地质,1986,5(2):49-61.
Zhang X P, Zhang C C, Wang D R. The trace fossils of Silurian and Devonian systems of the northwest region, Hunan Province [J]. Hunan Geology, 1986,5(2):49-61.
- [4] 王正和,谭钦银,何利,等. 川东南—黔北志留系石牛栏组沉积与层序地层[J]. 石油与天然气地质,2013,34(4):499-507.
Wang Z H, Tan Q Y, He L, et al. Deposition and sequence stratigraphy of the Silurian Shiniulan Formation in southeastern Sichuan-northern Guizhou Province [J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(4):499-507.
- [5] 杨明太,唐慧. 能量色散 X 射线荧光光谱仪现状及其发展趋势[J]. 核电子学与探测技术,2011,31(12):1307-1311.
Yang M T, Tang H. The actualities and trend of energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011,31(12):1307-1311.
- [6] 杨明太. 放射性核素迁移研究的现状[J]. 核电子学与探测技术,2006,26(6):1025-1028.
Yang M T. Recent developments in studies for migration of radionuclides [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006,26(6):1025-1028.
- [7] 吉昂. X 射线荧光光谱三十年[J]. 岩矿测试,2012,31(3):383-398.
Ji A. Development of X-ray fluorescence spectrometry in the 30 years [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012,31(3):383-398.
- [8] Andrew T, Montserrat F. Field-portable-XRF reveals the ubiquity of antimony in plastic consumer products [J]. Science of the Total Environment, 2017,584-585:982-989.
- [9] 孔芹,陈磊,汪灵. 非金属矿二级标样配制及其粉末样品的 XRF 分析方法[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(5):1405-1409.
Kong Q, Chen L, Wang L. Preparation of sub-standard samples and XRF analytical method of powder non-metallic minerals [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012,32(5):1405-1409.
- [10] 高拉凡,王长城,杨海欧,等. XRF 法四川盆地须家河组沉积相研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(6):1904-1909.
Gao L F, Wang C C, Yang H O, et al. Application of X-ray fluorescence spectrometry in Xujiaba Formation of Sichuan basin for the study of sedimentary facies [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(6):1904-1909.
- [11] 王国平,刘景双,翟正丽. 沼泽沉积剖面特征元素比值及其环境意义——盐碱化指标及气候干湿变化[J]. 地理科学,2005,25(3):335-339.
Wang G P, Liu J S, Zhai Z L. Ratio of elements and their implications within typical sedimentation profile in the marsh—Salinization indicators and climatic change between the arid and the humid [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005,25(3):335-339.
- [12] 熊小辉,肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境,2011,39(3):405-414.
Xiong X H, Xiao J F. Geochemical indicators of sedimentary environments—A summary [J]. Earth and Environment, 2011,39(3):405-414.
- [13] 金艳,傅强. 东海盆地某油气田井层沉积体系研究[J]. 海洋石油,2013(4):19-23.
Jin Y, Fu Q. Study on sedimentary system of formation in Well A in and gas field of East China Sea [J]. Offshore Oil, 2013(4):19-23.
- [14] 朱志军,陈洪德,林良彪,等. 黔北—川东南志留系层序格架下的沉积体系演化特征及有利区带预测[J]. 地质科技情报,2010,29(2):24-32.
Zhu Z J, Chen H D, Lin L B, et al. Depositional system evolution characteristics in the frame work of sequences of

- Silurian and prediction of favorable zones in the Northern Gui Zhou—Southeastern Sichuan[J]. *Geological Science and Technology Information*,2010,29(2):24-32.
- [15] 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 G,Zhou D S. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment—Taking Qianjiang Formation in the Jianghan basin as an example [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29 (3): 307-314.
- [16] 钱利军,陈洪德,林良彪,等. 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[J]. *沉积学报*,2012,30(6):1061-1071.
- Qian L J, Chen H D, Lin L B, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of middle Jurassic Shaximiao Formation, western margin of Sichuan basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30 (6): 1061-1071.
- [17] 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. *矿物岩石*,2005,25(1):67-73.
- Song M S. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of Southern Ramp, Dongying depression [J]. *Journal of Mineral Petrology*,2005,25(1):67-73.
- [18] 邓平. 微量元素在油气勘探中的应用[J]. *石油勘探与开发*,1993,20(1):27-32.
- Deng P. The application of trace amount of elements in the exploration of oil and gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*,1993,20(1):27-32.
- [19] 孙顺才. 长江三角洲全新世沉积特征[J]. *海洋学报*,1981,3(1):97-113.
- Sun S C. Deltaic sediments of the Changjiang Delta and its characteristics[J]. *Acta Oceanologica Sinica*,1981,3(1):97-113.
- [20] 马光祖,梁国立. 地质样品的X射线荧光光谱分析[J]. *岩矿测试*,1992,11(1-2):37-43.
- Ma G Z, Liang G L. X-ray fluorescence spectrometric analysis of geological samples [J]. *Rock and Mineral Analysis*,1992,11(1-2):37-43.
- [21] 王随继,黄杏珍,妥进才,等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. *沉积学报*,1997,15(1):65-70.
- Wang S J, Huang X Z, Tuo J C, et al. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,1997,15(1):65-70.
- [22] 安凤桐,高善明,李元芳. 用微量元素分析法研究滦河三角洲沉积环境[J]. *海洋湖沼通报*,1982(2):24-31.
- An F T, Gao S M, Li Y F. A research on depositional environment of delta by analyzed method of trace elements in Luanher River [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*,1982(2):24-31.

Research on the Sedimentary and Paleoclimate Environment of the Xiaohaba Formation in Southeastern Sichuan Based on the Trace Elements Ratio Method

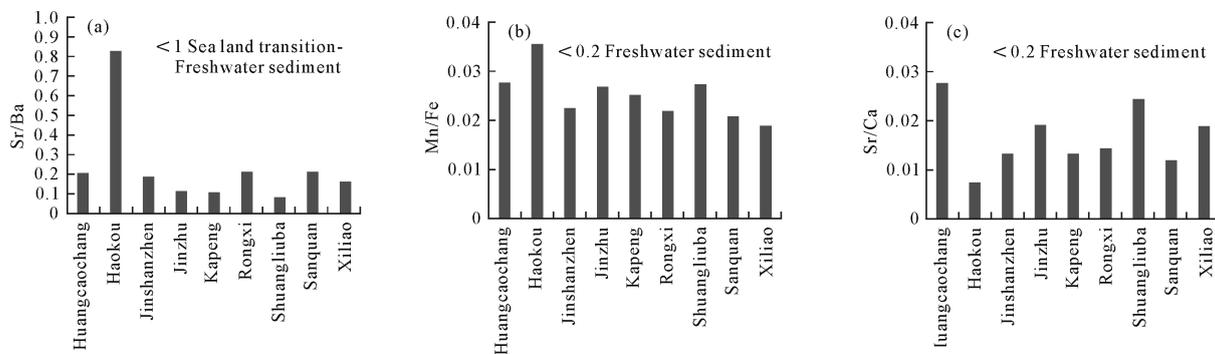
YANG Hai-ou¹, WANG Chang-cheng^{1,2*}, LI Wen-jie¹, DONG Hua¹, GONG Xiao-xing¹

(1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Highlights

- Trace element ratio analysis can realize semi-quantitative discrimination of sedimentary environment and promote further development of quantitative study of sedimentary environment.
- Xiaohaba formation belonged to a warm and humid paleoclimate in southeast area of Sichuan Province.
- Xiaohaba formation was delta freshwater sedimentary in the southeast area of Sichuan Province.



Abstract: Lower Silurian sandstone of the Xiaohaba formation in Southeastern Sichuan has a good reservoir seal combination, and an oil and gas geological condition, but the hypothesis that the sedimentary environment belongs to continental or marine sedimentary deltas remains a matter of debate. In order to solve this problem, 74 samples were collected from 9 typical sections. The elemental composition was determined by the trace element ratio method. Combined with the tectonic background and source characteristics, the sedimentary and paleoclimatic environment were discussed. X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) was used to analyze Ba, Mn, Sr, Cu and other trace elements, which are useful in discriminating between the sea and land facies sedimentary environment. The results show that the average Sr/Ba value is 0.2790 with the maximum of 2.31, the Mn/Fe value is 0.0093 to 0.0778, and the Sr/Ca value is 0.0005 to 0.0414, typical of freshwater delta sedimentary characteristics. The average Sr/Ba is less than 1, the average Sr/Cu is 4.8758, and more than 8.1% samples have Sr/Cu values greater than 10, reflecting the warm, moist, ancient climate environment.

Key words: trace elements; Xiaohaba Formation; sedimentary environment; paleoclimate; X-ray Fluorescence Spectrometry