

川东北地区七里峡剖面须家河组泥岩地球化学特征 及其地质意义

赖 玮¹, 阮 壮¹, 王黎栋², 沈臻欢¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 泥岩中对沉积环境敏感的元素或元素比值可以定性或半定量地反映古沉积环境。研究通过川东北地区七里峡剖面须家河组 12 件泥岩样品的扫描电镜观察, 主微量元素、X 射线衍射的测试分析, 开展了该区古气候、古环境及物源特征研究。研究结果表明, 七里峡剖面须家河组细粒泥岩样品中的粘土矿物以伊-蒙混层矿物为主(含量 62% ~ 88%), 其次是绿泥石(3% ~ 19%)、伊利石(3% ~ 11%)、高岭石(1% ~ 9%), FeO/MnO 值为 28.08 ~ 104.23, 反映七里峡地区晚三叠世总体温暖潮湿的气候条件, 其中须三、五段沉积期气候较为温湿, 须一、二、四段沉积期气候略干热; 较低的 Li、Sr、Ni、Ga 丰度及 Sr/Ba 值(0.08 ~ 0.24)揭示了须家河组泥岩沉积时水体盐度较低; V/(V + Ni)值(0.69 ~ 0.85)和 Ce_{anom} (0.26 ~ 0.30)等指示须家河组沉积时期为缺氧的还原环境, 且须一段到须五段水体的还原性逐渐减弱; 研究区样品的稀土元素配分曲线与南秦岭、龙门山和米仓山-大巴山地区类似, 指示了区内早期物源主要来自南秦岭地区闪长岩、花岗岩和玄武岩的混合, 部分来自龙门山地区的花岗岩, 晚期物质来源以米仓山-大巴山花岗岩为主。

关键词: 古环境; 地球化学特征; 须家河组; 三叠系; 川东北

中图分类号: P588.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)05-0657-16

Geochemical characteristics of Xujiache Formation mudstones in the Qilixia section of northeast Sichuan area and their geological significance

LAI Wei¹, RUAN Zhuang¹, WANG Li-dong² and SHEN Zhen-huan¹

(1. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Paleo-sedimentary environment could be recovered qualitatively or semi-quantitatively by using elements or element ratios sensitive to sedimentary environment of mudstone. In this study, major, trace and rare earth elements compositions, XRD and SEM of 12 rock samples from Xujiache Formation were analyzed to investigate the paleoclimate, paleo-sedimentation and paleo-provenance in the Qilixia section, northeast Sichuan area. The results show that the content of clay minerals in the fine-grain samples of the Xujiache Formation in the Qilixia section is dominated by illite-montmorillonite mixed-layer mineral (62% ~ 88%), followed by chlorite (3% ~ 19%), illite (3% ~ 11%), and kaolinite (1% ~ 9%), with FeO/MnO ratios being 28.08 ~ 104.23, reflecting the warm and humid climatic conditions of the Late Triassic in the Qilixia area, in which the climate of the 3rd and 5th members of the sedimentary period were relatively warm and humid, and the climate of the 1st, 2nd and 4th members of the

收稿日期: 2019-05-12; 接受日期: 2019-07-24; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中央高校基本业务费项目(2652017458)

作者简介: 赖 玮(1994-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 445790242@qq.com; 通讯作者: 阮 壮(1983-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事沉积岩石学、层序地层学、地球化学研究, E-mail: ruanz0103@cugb.edu.cn.

sedimentary period were slightly arid and hot; lower Li, Sr, Ni and Ga abundances and Sr/Ba ratios (0.08 ~ 0.24) of the Xujiahe Formation suggest that the paleo-salinity of sedimentary water was low; $V/(V + Ni)$ ratios (0.69 ~ 0.85) and Ce_{anom} (0.26 ~ 0.30) indicate that there existed a reducing environment in Xujiahe sedimentary period, with the reductivity of water gradually weakened from the 1st to the 5th member of the Xujiahe Formation. The REE distribution patterns of samples in the study area are similar to those in South Qinling Mountain, Longmen Mountain and Micang-Daba Mountain areas, indicating that the early provenance in this area was derived mainly from the mixture of diorite, granite and basalt in the South Qinling Mountain, with some from the granite of Longmen Mountain, whereas the late provenance was mainly derived from the granite of Micang-Daba Mountain.

Key words: paleo-sedimentation; geochemical characteristics; Xujiahe Formation; Triassic; northeast Sichuan area

Fund support: Central University Basic Scientific Research Operating Expenses (2652017458)

利用元素地球化学特征识别原始沉积环境具有重要的地质意义。在沉积和成岩过程中,性质稳定的地球化学元素被广泛用来推断物源区的组成特征,判别大地构造背景并重建古沉积环境,取得了较好的效果(Taylor and Mclenman, 1985; 雷开宇, 2017)。主微量元素及其含量对沉积环境的变化有着较高的敏感度,可以为古环境(如古盐度、氧化还原条件等)、古气候的变迁提供可靠信息(Rimmer *et al.*, 2004)。稀土元素在沉积和变质过程中稳定性较强、不易迁移,能很好地反映源岩的地球化学学习性,是良好的物源指示剂(Prudenio *et al.*, 1989)。

在中晚三叠世之交,四川盆地的龙门山前陆构造带活动剧烈,使四川盆地由早期的浅海环境迅速转变为内陆湖盆环境,在其后的晚三叠世发育一套内陆湖盆背景的三角州-湖泊沉积体系(郭正吾等, 1996)。同时,晚三叠世是扬子板块与华北板块碰撞的关键时期,扬子板块北侧的南北向挤压作用导致南秦岭与四川盆地间的米仓山-大巴山地区广泛发育东西向褶皱变形,并逐渐向南部供源(施炜等, 2007)。活跃的构造活动必然伴随着古环境、古气候及物源的变迁,上三叠统须家河组作为晚三叠世古环境、古气候及物源变化研究的窗口,一直以来受到众多学者的关注。目前对于四川盆地须家河组的物质来源、沉积环境、岩相古地理、聚煤特征等方面均积累了大量的研究成果,如淡永等(2013)通过对野外和钻井剖面的研究认为米仓山-大巴山前缘上三叠统须家河组四段砾岩来源于北东部的南秦岭地区;谢继容等(2006)认为晚三叠世四川盆地沉积主要受古龙门山、古大巴山、江南古陆和康滇古陆四大物源体系控制;施振生等(2011)指出晚三叠世四川盆地以超稳定型重矿物为主且物源区相对稳定,母岩类型主要为沉积岩和低级变质岩;郑荣才等

(2009)通过对四川盆地构造格局和盆-山耦合关系的分析确定了该盆地属于类前陆盆地;邵龙义等(2008)利用钻井岩心、测井等对宝鼎盆地含煤岩系研究认为聚煤作用在垂向上先增强再减弱;谭聪等(2017)通过观察及分析露头剖面、钻井岩心和测井地震等资料尝试性地建立了年代地层格架,推测了各旋回的相对年龄值以及不整合面的沉积间断时间。在川东北地区,前人对古气候和物源的研究工作多基于沉积学和古生物学的研究,如徐兆辉等(2010)通过孢粉分析法等认为须家河组沉积时期整体为湿热的热带-亚热带气候,张超(2017)通过轻矿物分析得出须家河组物源来自秦岭及大巴山古隆起,而很少从矿物学及地球化学特征出发进行探讨和研究。本文以川东北七里峡地区上三叠统须家河组发育的泥岩为研究对象,通过镜下观察、主微量及粘土分析,探讨其矿物学组成和地球化学特征,欲进一步揭示该区的古沉积环境和物源信息。

1 区域地质背景

现今四川盆地的构造格局于印支运动后期开始出现,经燕山运动至喜马拉雅运动改造后才得以定形,主要受北东-南西向及北西向两条构造线控制,整体为一个大型菱形构造-沉积盆地,面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ (郑荣才等, 2009; 徐兆辉等, 2010),西以龙门山断裂为界,东以七曜山断裂为界,北以城口断裂为界,南以峨眉-瓦山断裂为界。习惯上将目前的四川盆地划分为川西坳陷、川东北坳陷、川东南坳陷及川中隆起4个次级构造单元,具备非常特殊的“三坳围一隆”构造-沉积格局(图1a)。震旦纪晚期至中三叠世在现今四川盆地的范围内发育广阔的海相碳酸盐沉积。始于中三叠世拉丁期的印支早幕运动造成了上扬子

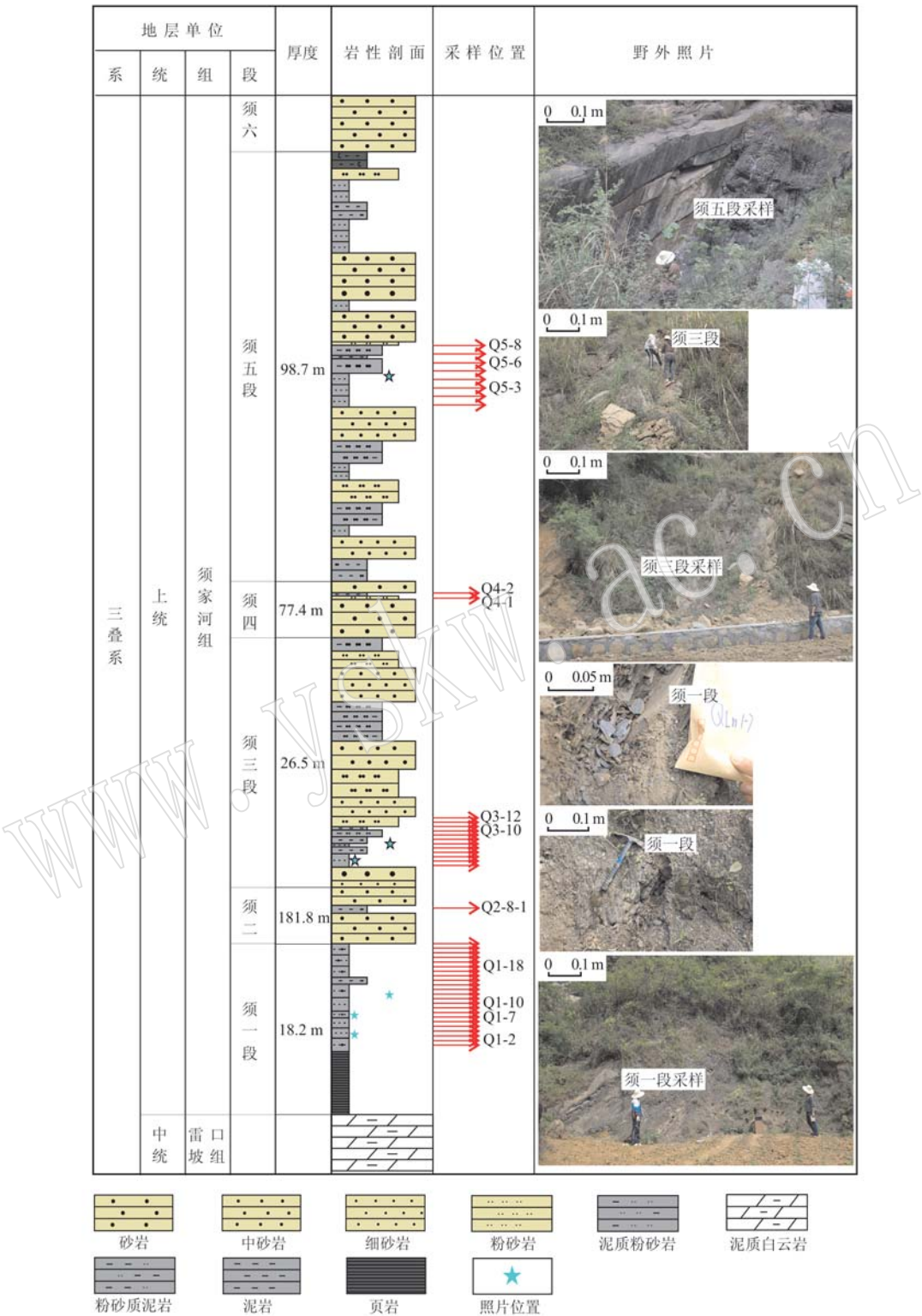


图 2 七里峡剖面采样位置及岩性柱状图(柱状图据谭聪等, 2017)

Fig. 2 The sampling position and lithologic histogram of Qilixia section (histogram after Tan Cong *et al.*, 2017)

湿度 54%，分析误差小于 3%，其中 FeO 含量采用滴定法测试。微量元素采用 ELEMENT XR 等离子体质谱仪分析，测试温度 22.5℃，相对湿度 28%，分析误差小于 5%。另外选取 4 件样品进行了扫描电镜

观察,观察地点为中国地质大学(北京)科学研究院场发射扫描电镜实验室,使用仪器型号为 SU-PRATM55 型场发射扫描电镜,能谱数据收集采用 20 kV,SE、BSE 照相采用15 kV。

3 测试结果

3.1 岩石学特征

通过野外露头及室内薄片鉴定分析,此次所采集岩石样品的岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩(图3)。野外观察剖面在泥岩层和粉砂质泥岩层中可见明显的水平层理,岩石样品多为灰色、灰黑色,部分含铁质、有机质、黄铁矿等物质,岩石样品颜色变化较大。通过镜下观察和粘土矿物 X 衍射分析可知,研究区泥岩(图3a、3b)主要由粘土矿物和少量陆源碎屑矿物组成;粘土矿物含量大

于 50%,主要是伊蒙混层、伊利石、绿泥石和高岭石(表1);陆源碎屑矿物主要为石英、云母和极少量长石,其中石英分选磨圆较差,粒径多为 20~50 μm ,此外多可见植物碎屑。粉砂质泥岩(图3c、3d)的碎屑颗粒含量与泥岩相比较,但颗粒多小于 0.01 mm。粉砂岩(图3e)的主要矿物成分为石英,含少量云母、长石,填隙物多为泥质基质。泥质粉砂岩(图3f)则以粉砂为主,含量为 50%~70%,粘土及胶结物较少。在扫描电镜下观察粘土矿物,可见书页状高岭石(图4a)和他形片状高岭石(图4b);伊蒙混层矿物主要呈片状或丝状(图4c);伊利石多呈片状集合体,也可见特征弯曲鳞片状(图4d、4e);绿泥石也多为片状(图4f)。

3.2 XRD 粘土矿物分析

X 射线衍射粘土矿物分析结果显示,所测样品主要由4种粘土矿物组成(表1),分别为伊蒙混层

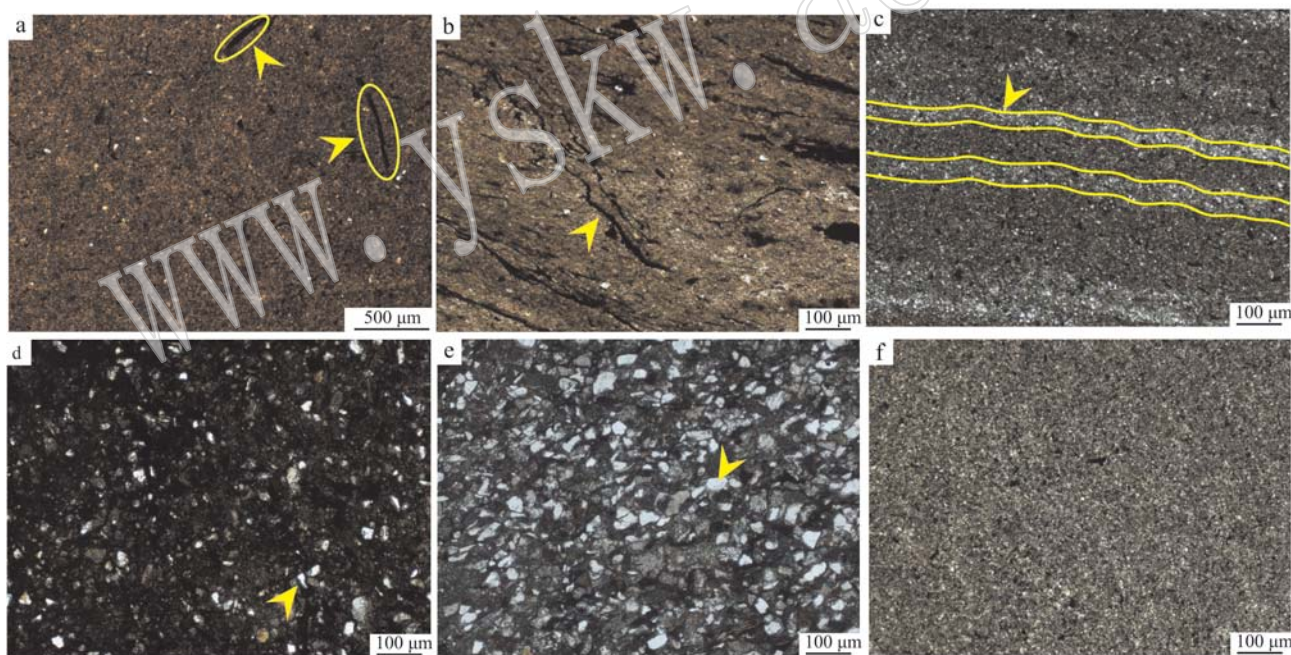


图3 七里峡剖面须家河组岩石样品镜下观察照片(单偏光)

Fig. 3 Microscopic observation of rock samples from the Xujiahe Formation in Qilixia section (plainlight)

a—泥岩,含少量植物碎屑(黄色箭头)、陆源碎屑和碳酸盐,须一段; b—泥岩,有机质含量较高,须三段; c—粉砂质泥岩,有纹层现象,成层性明显(黄色箭头),须一段; d—粉砂质泥岩,须三段; e—粉砂岩,主要成分为石英、长石、云母,石英(黄色箭头),分选磨圆较差且含量较高,粒径约 0.02~0.06 mm,须三段; f—泥质粉砂岩,主要为粉砂,含少量粘土矿物及胶结物,须五段

a—mudstone, containing a small amount of plant fragments (yellow arrow), terrigenous fragments and carbonate, 1st Member of Xujiahe Formation; b—mudstone, high organic content, 3rd Member of Xujiahe Formation; c—silty mudstone, significant lamina phenomenon (yellow arrow), 1st Member of Xujiahe Formation; d—silty mudstone, 3rd Member of Xujiahe Formation; e—siltstone, the main components comprising quartz, feldspar, mica, quartz (yellow arrow), selecting poor, content high, particle size ranging 0.02~0.06 mm, 3rd Member of Xujiahe Formation; f—muddy siltstone, the main ingredient being silt with a small amount of clay minerals and cement, 5th Member of Xujiahe Formation

表 1 七里峡剖面须家河组泥岩样品粘土矿物含量表
Table 1 Relative content of clay minerals in samples of Xujiache Formation of Qilixia section

样品编号	$w_B/\%$				伊蒙混层比
	I/S	I	K	C	
Q1-2	81	11	3	5	5
Q1-7	88	4	3	5	5
Q1-10	88	5	3	4	5
Q1-18	85	3	4	8	5
Q2-8-1	86	4	2	8	5
Q3-10	87	5	3	5	5
Q3-12	88	8	1	3	5
Q4-1	84	3	4	9	5
Q4-2	84	4	5	7	5
Q5-3	66	7	9	18	5
Q5-6	74	5	7	14	5
Q5-8	62	10	9	19	5

I/S: 伊蒙混层矿物; I—伊利石; K—高岭石; C—绿泥石。

矿物(I/S)、绿泥石(C)、伊利石(I)和高岭石(K)。它们的相对含量中,伊蒙混层矿物含量最高,为62%~88%,平均81.08%,其次是绿泥石(3%~19%,平均8.75%),伊利石含量为3%~11%,平均5.75%,

高岭石含量为1%~9%,平均4.42%。

3.3 主量元素特征

须家河组泥岩样品主量元素测试结果列于表2,其主量元素上地壳标准化蛛网图见图5a。与上地壳相比, SiO_2 、 CaO 和 Na_2O 含量较低,其均值为58.83%(51.99%~64.83%)、1.74%(0.34%~6.19%)和0.51%(0.13%~1.16%),其中 CaO 和 Na_2O 含量变化较大。 Al_2O_3 (16.61%)、 TiO_2 (0.79%)、 MgO (2.61%)、 K_2O (4.09%)、 MnO (0.84%)和 P_2O_5 (0.19%)的均值含量与上地壳相比轻微富集,其中 MnO 和 P_2O_5 含量变化较大。 FeO/MnO 值介于28.08~104.23之间。

3.4 微量元素及稀土元素特征

须家河组泥岩样品微量元素测试结果见表3,其微量元素上地壳标准化蛛网图见图5b。从图表中可以看出,与上地壳相比,泥岩样品中Li、V、Cr、Ni、Cd、Cs等微量元素较为富集,Sc和Co稍微富集,而Sr、Mo、Ba、Zr、Hf等元素则具一定程度亏损,其中Sr元素异常亏损。须家河组泥岩样品稀土元素测试结果(表4)显示,样品的稀土元素总量(ΣREE)介于

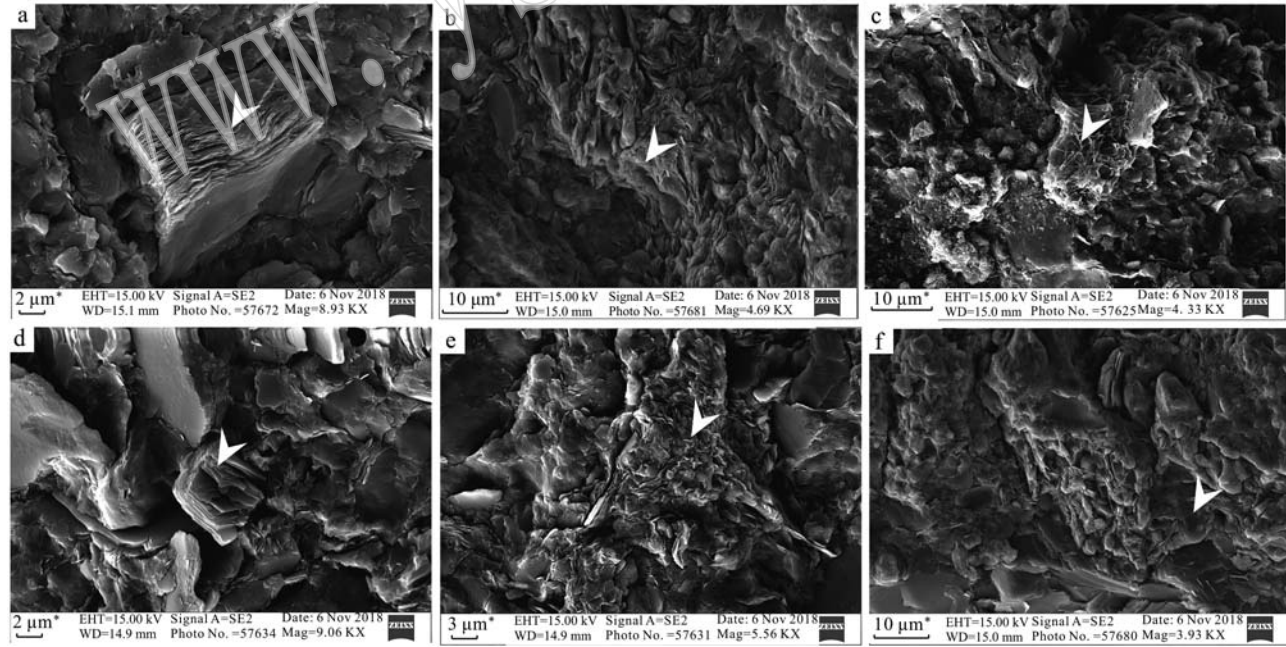


图 4 七里峡剖面须家河组泥岩典型粘土矿物扫描电镜照片

Fig.4 The scanning electronic microphotographs of typical clay minerals for the Xujiache Formation in Qilixia section

a—书页状高岭石; b—他形片状高岭石; c—表面呈丝状的伊蒙混层矿物; d—片状伊利石; e—特征弯曲鳞片状伊利石; f—叶片状绿泥石
a—booklet kaolinite; b—irregular flaky kaolinite; c—illite-montmorillonite mixed-layer mineral whose surface is silky; d—flaky illite;
e—characteristic curved scaly illite; f—leave-like chlorite

表2 七里峡剖面须家河组泥岩主量元素含量表

 $w_B/\%$

Table 2 Analyses of major elements in samples of the Xujiache Formation of the Qilixia section

样品编号	Q1-2	Q1-7	Q1-10	Q1-18	Q2-8-1	Q3-10	Q3-12	Q4-1	Q4-2	Q5-3	Q5-6	Q5-8
SiO ₂	60.63	54.86	54.02	51.99	53.45	64.83	62.39	58.55	60.22	59.99	61.38	63.62
Al ₂ O ₃	17.92	19.78	19.55	14.83	16.23	15.57	17.30	15.29	14.88	16.51	15.58	15.82
Fe ₂ O ₃ ^T	5.91	6.46	6.92	5.64	5.08	5.62	5.61	6.20	6.46	7.78	7.43	6.63
FeO	4.71	5.52	5.21	4.72	3.66	3.00	2.31	3.72	2.78	6.42	5.42	5.42
MgO	2.34	2.78	2.63	3.75	3.12	1.77	1.57	3.06	2.90	2.51	2.68	2.19
CaO	0.36	0.34	0.44	6.19	5.51	0.40	0.48	2.42	2.07	1.03	1.06	0.63
Na ₂ O	0.21	0.13	0.13	0.21	0.18	0.78	0.60	0.54	0.61	0.52	1.00	1.16
K ₂ O	5.27	5.81	5.57	4.30	4.30	3.46	3.83	3.50	3.33	3.53	3.11	3.06
MnO	0.08	0.11	0.15	0.10	0.12	0.03	0.03	0.08	0.10	0.07	0.08	0.05
TiO ₂	0.82	0.81	0.83	0.73	0.79	0.69	0.74	0.84	0.78	0.80	0.82	0.84
P ₂ O ₅	0.17	0.13	0.16	0.17	0.23	0.10	0.07	0.16	0.16	0.58	0.18	0.16
LOI	6.20	8.75	9.54	12.04	10.97	6.74	7.31	9.29	8.44	6.64	6.64	5.82
FeO/MnO	60.38	51.11	34.50	45.38	30.50	100.00	72.19	44.29	28.08	98.77	66.91	104.23

表3 七里峡剖面须家河组泥岩微量元素分析结果表

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Analyses of trace elements in samples of Xujiache Formation in the Qilixia section

样号	Q1-2	Q1-7	Q1-10	Q1-18	Q2-8-1	Q3-10	Q3-12	Q4-1	Q4-2	Q5-3	Q5-6	Q5-8	平均值	上地壳	浓度系数
Li	87.80	112.00	121.00	57.60	65.90	59.50	74.90	54.20	54.20	40.60	34.70	34.30	66.39	20.00	3.32
Be	2.96	3.66	3.64	2.38	5.72	3.14	3.98	3.92	3.37	2.58	2.30	2.48	3.34	3.00	1.11
Sc	18.80	20.70	20.50	15.50	18.70	12.80	13.40	15.80	14.70	18.40	17.30	17.30	16.99	11.00	1.54
V	192.00	156.00	157.00	93.90	179.00	86.30	84.90	101.00	94.20	100.00	93.20	93.30	119.23	60.00	1.99
Cr	97.50	89.20	91.00	71.40	101.00	68.60	69.90	79.70	71.20	67.60	63.10	66.30	78.04	35.00	2.23
Co	17.50	17.00	21.80	15.20	12.40	15.30	15.40	16.00	15.00	19.10	15.70	15.30	16.31	10.00	1.63
Ni	34.50	37.80	42.50	34.60	33.00	34.90	37.80	35.20	33.70	35.90	32.40	31.80	35.34	20.00	1.77
Cu	40.50	51.60	49.10	37.70	40.10	25.40	20.20	37.20	33.40	47.10	44.60	39.40	38.86	25.00	1.55
Zn	78.40	111.00	147.00	98.10	72.00	113.00	75.40	102.00	101.00	163.00	101.00	92.20	104.51	71.00	1.47
Ga	25.80	26.00	26.70	20.90	28.00	20.20	24.40	21.90	20.00	24.90	21.40	21.30	23.46	17.00	1.38
Rb	191.00	215.00	215.00	146.00	184.00	133.00	133.00	137.00	132.00	128.00	104.00	103.00	151.75	112.00	1.35
Sr	82.90	64.30	63.60	107.00	71.90	62.20	63.30	74.30	71.30	54.00	49.50	54.60	68.24	350.00	0.19
Mo	0.82	1.51	1.33	0.66	0.63	0.44	0.61	0.62	0.58	0.55	0.38	0.81	0.74	1.50	0.50
Cd	0.09	0.27	0.34	0.20	0.08	0.20	0.08	0.29	0.24	0.53	0.23	0.17	0.23	98.00	0.00
In	0.09	0.10	0.10	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	50.00	0.00
Cs	14.10	18.60	18.90	9.95	15.10	11.20	11.20	9.95	8.52	8.35	5.33	5.22	11.37	3.70	3.07
Ba	488.00	361.00	359.00	440.00	564.00	441.00	525.00	980.00	883.00	524.00	509.00	503.00	548.08	550.00	1.00
W	2.33	2.33	2.46	1.96	2.28	1.62	1.69	2.23	1.80	1.41	1.33	1.32	1.90	2.00	0.95
Tl	0.90	0.91	0.93	0.70	0.77	0.64	0.69	0.74	0.69	0.71	0.54	0.53	0.73	0.75	0.97
Pb	30.20	13.40	20.40	23.30	17.20	17.60	10.60	24.90	22.80	19.40	16.60	15.70	19.34	20.00	0.97
Bi	0.51	0.64	0.67	0.45	0.46	0.30	0.33	0.36	0.32	0.36	0.28	0.27	0.41	0.13	3.25
Th	18.80	16.40	17.70	15.00	17.10	9.92	10.00	14.60	13.20	9.58	9.49	9.73	13.46	10.70	1.26
U	4.45	6.15	8.86	2.96	3.18	2.58	2.71	2.85	2.51	2.83	2.24	2.38	3.64	2.80	1.30
Nb	19.40	16.50	18.10	17.30	19.60	13.20	14.20	18.90	17.10	18.70	14.50	14.70	16.85	12.00	1.40
Ta	1.47	1.25	1.39	1.34	1.43	1.02	1.09	1.30	1.27	1.02	1.05	1.08	1.23	0.96	1.28
Zr	147.00	127.00	138.00	125.00	154.00	147.00	155.00	138.00	135.00	182.00	164.00	169.00	148.42	190.00	0.78
Hf	4.94	4.07	4.33	3.96	4.73	4.75	4.68	4.44	4.09	4.91	5.48	5.46	4.65	5.80	0.80
Sr/Ba	0.17	0.18	0.18	0.24	0.13	0.14	0.12	0.08	0.08	0.10	0.10	0.11	0.14	—	—
V/(V + Ni)	0.85	0.80	0.79	0.73	0.84	0.71	0.69	0.74	0.74	0.74	0.74	0.75	0.76	—	—

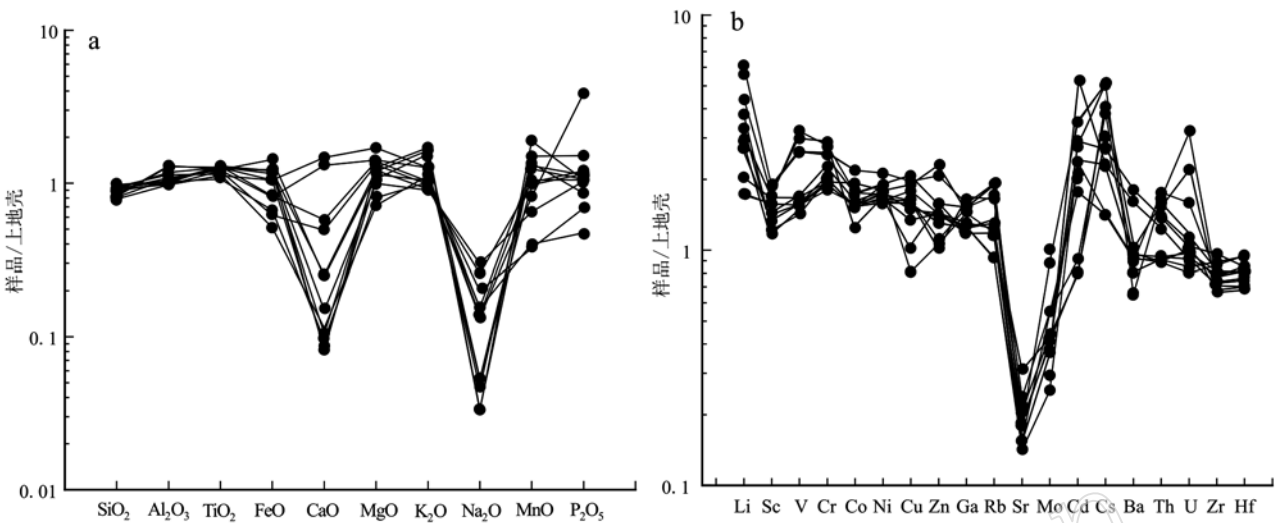


图5 须家河组泥岩主微量元素上地壳标准化蛛网图解[上地壳数据据 Taylor 和 Mclenman (1985)]
Fig.5 UCC-normalized spider diagram of major and trace element compositions of mudstones in the Xujiaye Formation
(UCC values from Taylor and Mclenman, 1985)

表4 七里峡剖面须家河组泥岩稀土元素分析结果表

$w_B/10^{-6}$

Table 4 Results of rare earth elements in samples of the Xujiaye Formation of the Qilixia section

样品编号	Q1-2	Q1-7	Q1-10	Q1-18	Q2-8-1	Q3-10	Q3-12	Q4-1	Q4-2	Q5-3	Q5-6	Q5-8
La	47.80	40.30	41.90	40.50	55.60	33.70	48.80	47.50	46.00	47.80	36.60	39.40
Ce	88.20	75.00	78.10	77.00	98.60	62.10	79.40	85.10	84.20	90.10	70.60	77.00
Pr	10.90	8.83	9.62	9.32	11.40	7.42	9.29	10.50	10.40	11.30	8.78	9.43
Nd	40.10	33.00	37.20	34.40	40.50	28.00	34.70	39.00	39.80	46.60	35.50	37.10
Sm	7.56	6.35	6.95	6.38	7.27	5.51	5.73	7.30	7.21	9.49	6.96	7.17
Eu	1.42	1.30	1.38	1.28	1.40	1.24	1.26	1.53	1.49	1.97	1.60	1.48
Gd	6.23	5.47	5.89	5.49	5.87	4.66	4.94	6.34	6.09	8.99	6.12	5.91
Tb	1.07	0.98	1.04	0.96	1.00	0.83	0.82	1.08	1.06	1.79	1.18	1.03
Dy	5.52	5.22	5.72	4.93	5.50	4.23	4.29	5.47	5.42	9.01	6.31	5.43
Ho	1.13	1.06	1.13	1.03	1.08	0.90	0.95	1.10	1.08	1.91	1.39	1.11
Er	3.22	2.91	3.19	2.92	3.19	2.45	2.81	2.96	2.95	4.85	3.81	3.20
Tm	0.58	0.53	0.55	0.49	0.56	0.46	0.54	0.53	0.51	0.83	0.69	0.61
Yb	3.61	3.15	3.61	3.23	3.53	2.80	3.48	3.34	3.29	4.96	4.13	3.95
Lu	0.50	0.46	0.50	0.44	0.52	0.40	0.51	0.45	0.44	0.73	0.60	0.55
Y	28.70	27.90	30.00	27.90	29.20	24.50	26.20	29.50	29.60	51.40	36.90	28.40
ΣREE	246.54	212.46	226.77	216.27	265.21	179.21	223.71	241.70	239.54	291.73	221.17	221.77
LREE	195.98	164.78	175.15	168.88	214.77	137.97	179.18	190.93	189.10	207.26	160.04	171.58
HREE	50.56	47.68	51.62	47.39	50.44	41.24	44.53	50.77	50.44	84.47	61.13	50.19
LREE/HREE	3.88	3.46	3.39	3.56	4.26	3.35	4.02	3.76	3.75	2.45	2.62	3.42
δCe	3.01	3.05	3.03	3.09	2.94	3.02	2.73	2.93	2.99	3.05	3.11	3.15
δEu	0.21	0.22	0.21	0.22	0.21	0.24	0.24	0.22	0.22	0.21	0.24	0.23
La/Yb	13.24	12.79	11.61	12.54	15.75	12.04	14.02	14.22	13.98	9.64	8.86	9.97
Ce _{anom}	0.29	0.30	0.29	0.30	0.29	0.29	0.26	0.28	0.28	0.28	0.29	0.30

$179.21 \times 10^{-6} \sim 291.73 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 232.17×10^{-6} (刘清俊等, 2014),也远高于上地壳的稀土元素平均总量(143×10^{-6})。样品 LREE 为 $137.97 \times$

$10^{-6} \sim 214.77 \times 10^{-6}$, 平均值 179.64×10^{-6} , HREE 为 $41.24 \times 10^{-6} \sim 84.47 \times 10^{-6}$, 平均值为 52.54×10^{-6} , LREE/HREE 为 $2.45 \sim 4.26$, 平均 3.49 , 表明样品中轻稀土元素相对重稀土元素富集。Eu 呈负异常, δEu 介于 $0.21 \sim 0.24$ 之间; Ce 呈正异常, δCe 介于 $2.73 \sim 3.15$ 之间。Sr/Ba 值介于 $0.08 \sim 0.24$ 之间, $V/(V + \text{Ni})$ 值介于 $0.69 \sim 0.85$ 之间, Ce_{anom} 值介于 $0.26 \sim 0.30$ 之间。

4 讨论

4.1 古环境特征

4.1.1 古盐度

古盐度在恢复沉积环境和古气候中具有重要的应用, 目前的研究中通常使用元素比值法、硼法、磷酸盐法等来推断古盐度(张茜等, 2017)。戴朝成等(2018)通过硼含量和粘土矿物组成计算恢复了须家河组古盐度, 其总体介于 $4.8\text{‰} \sim 19.7\text{‰}$ 之间, 平均 12.8‰ , 远低于正常海水盐度。本文主要通过 Li、Sr、Ni、Ga 的元素含量及 Sr/Ba 值来分析水体古盐度特征。对研究区 12 件样品统计(表 5), Li 含量个别值大于 90×10^{-6} , Sr 含量所有值都小于 500×10^{-6} ,

Ni 含量个别值大于 40×10^{-6} , Ga 含量所有值都大于 17×10^{-6} 。通过对 Li、Sr、Ni、Ga 元素含量的分析, 判断须家河组属于淡水-微咸水沉积环境。

Sr/Ba 值是判断沉积时水体盐度的常用指标(田景春等, 2016)。在自然界的水体中, Sr 的迁移能力及其硫酸盐化合物的溶度积远大于 Ba。当水体盐度加大时, Ba 以 BaSO_4 的形式首先沉淀, 而留在水体中的 Sr 则相对 Ba 富集, 当水体盐度达到一定程度时, Sr 以 SrSO_4 的形式沉淀。因此, 沉积物中的 Sr/Ba 值与古盐度呈明显的正相关(郑荣才等, 1999)。研究区须家河组一段至五段 Sr/Ba 值(图 6a)介于 $0.08 \sim 0.24$, 须一段 > 须三段 > 须二段 > 须五段 > 须四段, 总体呈下降趋势, 但须一段 Sr/Ba 值明显高于其他沉积时期。这些变化表明在须一段沉积时期水体盐度最高, 是因为须一段处于海陆过渡的环境, 而其他层段沉积时已演化为陆相湖盆环境。

4.1.2 氧化还原环境

氧化还原敏感元素是确定古水体氧化还原环境的重要指标(王淑芳等, 2014)。目前, $V/(V + \text{Ni})$ 、 U/Th 、 V/Cr 、 Ni/Co 、 Cu/Zn 、 Ce_{anom} 等常用作水体的氧化还原指标。另外, 也有学者利用古生物来恢复氧化还原环境, 如刘丽静等(2014)通过对四川盆地东北部盘龙洞剖面晚二叠世一早三叠世古生物群落演替和古环境变化研究, 推断出环境从贫氧、缺氧再到贫氧的演化过程。

在还原条件下, V 比 Ni 以更有效的有机络合物形式沉淀下来, 因此 Ni 的优先富集可指示硫化还原环境, $V/(V + \text{Ni})$ 值(图 6b)可指示水体氧化还原条件(表 5)。研究区须家河组须一段至须五段样品 $V/(V + \text{Ni})$ 值介于 $0.69 \sim 0.85$ 之间, 平均值为 0.76 , 均大于 0.60 , 表明该区泥岩沉积时水体为还原环境。而须一至须五段 $V/(V + \text{Ni})$ 值总体有下降趋势, 亦可以指示还原性逐渐减弱。

稀土元素特征也可以反映沉积时古水体的氧化还原环境。在一定的酸碱条件下, 若水体为氧化环境, Ce^{3+} 会被氧化成 Ce^{4+} , Ce^{3+} 浓度降低; 反之若水体缺氧, Ce^{3+} 的浓度就会增加。因此, Ce_{anom} 指数常被作为判断古水体氧化还原条件的标志(表 5), 计算公式为 $\text{Ce}_{\text{anom}} = [3 \text{Ce}_N / (2 \text{La}_N + \text{Nd}_N)]$, N 为北美页岩标准化值。研究区 Ce_{anom} 介于 $0.26 \sim 0.30$ 之间(图 6c), 均大于 -0.1 , 代表当时的泥岩沉积水体处于缺氧的还原环境。

表 5 七里峡剖面须家河组判别古环境主微量元素

含量表 $w_B/10^{-6}$

Table 5 Determination of major and trace element content in paleo-sediments of Xujiahe Formation of the Qilixia section

判别参数	数值范围	平均值	判断标准	资料来源
Li	34.30~121.00	66.39	>150 <90	盐水环境 淡水环境
Sr	49.50~107.00	68.24	800~1 000 100~500	盐水环境 淡水环境
Ni	31.80~42.50	35.34	>40 20~25	盐水环境 淡水环境
Ga	20.00~26.70	23.46	<8 >17	盐水环境 淡水环境
Sr/Ba	0.08~0.24	0.14	<0.5 0.5~1 >1	陆相淡水 海陆过渡半咸水 咸水
$V/(V + \text{Ni})$	0.69~0.85	0.76	0.84~0.54 0.6~0.46 <0.46	缺氧环境 贫氧环境 氧化环境
Ce_{anom}	0.26~0.30	0.29	>-0.1 <-0.1	缺氧环境 氧化环境
FeO/MnO	28.08~104.23	61.36	高值 低值	温湿气候 干热气候

田景春等
(2016)

Hatch and
Leventhal
(1992)

师晶等
(2018)

徐兆辉等
(2010)

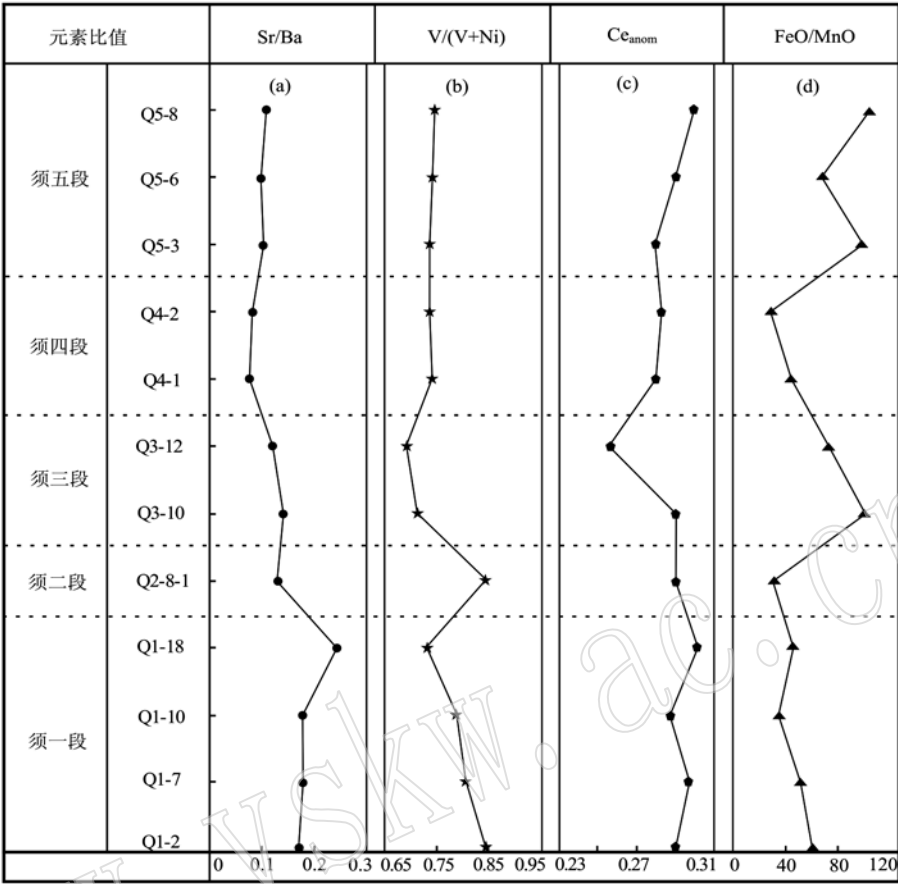


图 6 七里峡剖面须家河组元素比值及相关参数图
Fig. 6 Diagram of element ratio and related parameters of the Xujiahe Formation in Qilixia section

基于以上分析结果,认为研究区须家河组泥岩沉积期沉积水体整体为还原环境,且自须一段到须五段水体的还原性逐渐减弱,氧化性逐渐增强。

4.1.3 古气候

沉积岩中的主微量元素含量及比值已经被广泛地用于恢复古气候和判别沉积环境。 FeO/MnO 、 Ca/Mg 值等常被作为判别古气候变化的指标,也可采用 Sr 含量、Mn 含量、 Sr/Cu 值等判别古气候变化(田景春等, 2016)。前人(王全伟等, 2008; 徐兆辉等, 2010)通过对孢粉植物群的研究,即喜温的蕨类植物占大多数,裸子植物中喜温类型如罗汉松、苏铁等较为繁盛,推断出四川盆地晚三叠世须家河组沉积时期气候条件温暖湿润,属于热带-亚热带气候。

Mn 在干旱环境下含量比较高,在相对潮湿环境下则含量较低;Fe 在潮湿环境中易以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体快速沉淀。因此,沉积物中 FeO/MnO 值高时为温湿气候,低时则为干热气候(表 5)。由图 6 可知, FeO/MnO 值呈明显的旋回性,须一段、须二段呈变化

不大的低值,须三、五段较须二段和须四段的比值高,因此反映出须三、五段的气候较为温湿,须一、二、四段的气候较为干热。

此外,粘土矿物的含量、组合也可以反映古气候条件。对于古气候重建而言,由岩屑形成的粘土矿物才能作为风化条件的指示,而这些粘土矿物一旦成岩就其指示的气候信息就会遭到破坏,因此,利用粘土矿物判断古气候的一个重要步骤是判断粘土矿物是否为碎屑来源(Chamley, 1989)。本次扫描电镜观察发现,研究区样品中的粘土矿物多呈不规则片状,矿物晶形一般,存在书页状高岭石、片状伊利石等(图 4a、4d),粘土矿物未见次生加大,说明大部分粘土矿物并非自生成因(秦蕴珊等, 1987),指示了其碎屑来源,具有古气候分析的意义。须家河组粘土矿物有伊蒙混层、伊利石、绿泥石和高岭石,其中伊蒙混层矿物含量较高,伊蒙混层比较低(表 1),一般被认为是蒙脱石在成岩作用过程中向伊利石转化的过渡产物。有学者认为伊蒙混层矿物的存在,

代表气候逐渐转为潮湿的环境(曹珂等, 2010)。伊利石和绿泥石一般指示干冷的气候环境, 高岭石反映温暖潮湿的气候条件, 蒙脱石通常为碱性和暖湿风化气候条件下的产物(徐兆辉等, 2010)。假设泥岩中的伊蒙混层矿物均由蒙脱石转化而来, 须五段泥岩中的原始蒙脱石含量应当较低, 同时高岭石含量较高, 反映了须五段沉积期具有最为温湿的气候背景(表1), 这与须五段的 FeO/MnO 高值相对应。须一段至须四段泥岩中伊蒙混层矿物和高岭石含量变化不大, 难以根据粘土矿物含量分析其气候演化过程, 这也从侧面反映了沉积物源差异及后生成岩作用很大程度上会覆盖粘土矿物指示的气候信息。

因此, FeO/MnO 值以及粘土矿物含量变化反映七里峡地区须家河组总体气候条件为温暖潮湿, 其中须一、三、五段的气候较为温湿, 须二、四段的气候略干热。

4.2 物源分析

沉积物的地球化学特征研究对盆地物源区性质恢复具有重要的指示意义, 其中稀土元素分布模式是指示盆地沉积源区性质最可靠的指标, 能够真实地反映物源组成(周晓峰等, 2016)。研究区岩石样品经球粒陨石标准化后, 显示与上地壳基本一致的配分模式(图7a)。从图7a中可以看出, 配分曲线呈右倾型分布模式, 轻稀土元素富集, 重稀土元素平坦, 具明显的 Eu 负异常, 说明研究区样品的原始物质可能来自于上地壳。此外, Eu 异常可作为物源类型判别指标, 中性斜长岩多为 Eu 正异常, 玄武岩大多不显示异常, 而花岗岩则多为 Eu 负异常(刘清俊等, 2014)。样品的 δEu 介于 0.21 ~ 0.24 之间, 显示了源岩中花岗岩具 Eu 亏损。同时, 通过与周缘岩体稀土元素配分曲线的对比(图7)可以得出, 七里峡须家河组泥岩与南秦岭地区的花岗岩、闪长岩和玄武岩配分曲线最为吻合, 其次与龙门山和米仓山-大巴山地区的花岗岩较为吻合。

微量元素比值对于碎屑物源也具有良好的指示作用, 能指示沉积物源区岩石的成分特征。 Th/U 值是确定物源类型的重要标志(Bhatia and Taylor, 1981; Bhatia, 1983), 沉积岩中的 U^{4+} 和 U^{6+} 在再循环过程中受到氧化, 以可溶的状态从沉积岩中损失掉, 从而引起 Th/U 值的增高。 Th/U 值为 2.5 ~ 3.0 时, 物源主要为岛弧火山岩; Th/U 值约为 4.5 时, 主要为沉积岩, 可能有岛弧火山岩混入; Th/U 值约为 6 时, 其物源主要是再旋回沉积岩(Bhatia and Taylor,

1981; Bhatia, 1983)。须家河组泥岩的 Th/U 值介于 2.0 ~ 5.4 之间, 平均值为 4.1, 说明物源主要为沉积岩和岛弧火山岩。根据 $\text{La}/\text{Yb} - \sum \text{REE}$ 源岩判别图解进行研究区岩石样品投点(图8), 可见样品基本上都落在沉积岩与花岗岩、钙质泥岩、碱性玄武岩与花岗岩交汇区域, 说明四川盆地七里峡地区三叠系须家河组一、三、五段源岩主要为沉积岩、钙质泥岩、碱性玄武岩以及花岗岩, 显示出样品物源的多样性。

施振生等(2011)根据对 ZTR 指数分析得到须家河组主要发育西南、西北、东北和东南 4 个物源, 且川东北部的母岩主要以低级变质岩和沉积岩为主; 戴朝成等(2014)通过对轻、重矿物和岩屑类型、稀土和微量元素分析得到川东北拗陷物源主要受米仓-大巴山逆冲推覆带控制, 且须四期龙门山的逆冲推覆运动强于须二期; 张超(2017)由轻矿物分析砾岩特征推断盆地东北部的物源来自秦岭及大巴山古隆起。故根据前人研究(淡永等, 2013; 谢继容等, 2006; 周晓峰等, 2016)可知, 华南和华北两大板块在中三叠世末期碰撞形成秦岭褶皱造山带, 该造山带在晚三叠世持续向四川盆地北-北东部供给物源; 而三叠纪末龙门山也开始隆起并向盆地提供物源。因此, 川东北地区须家河组早期(须一段)物质来源主要是南秦岭地区, 部分为龙门山地区。须二期以后, 米仓山-大巴山造山带周期性的强烈逆冲推覆活动和持续隆升, 加大了北东方向物源的供给, 因此须家河组晚期物质来源逐渐以米仓山-大巴山造山带为主, 同时携带了来自南秦岭的再旋回物源。这种多源性也与七里峡泥岩和周缘岩体稀土元素配分曲线分析结果以及 $\text{La}/\text{Yb} - \sum \text{REE}$ 源岩判别图解投点情况相吻合。

综合地球化学特征及前人的研究工作可以认为, 川东北七里峡地区须家河组原始物质在早期(如须一段、须二段)主要来自南秦岭地区的闪长岩、花岗岩和玄武岩, 部分来自龙门山地区的花岗岩, 晚期物质来源主要以米仓山-大巴山花岗岩为主。

5 结论

(1) 七里峡地区三叠系须家河组样品中主量元素 SiO_2 、 CaO 和 Na_2O 亏损, 其余氧化物较上地壳轻微富集, 其中 CaO 、 Na_2O 、 MnO 含量变化较大。 Li 、 V 、 Cr 、 Ni 、 Cd 、 Cs 等微量元素较上地壳富集, Sc 、 Co 稍微富集, 而 Sr 、 Mo 、 Ba 、 Zr 、 Hf 等元素则表现为亏

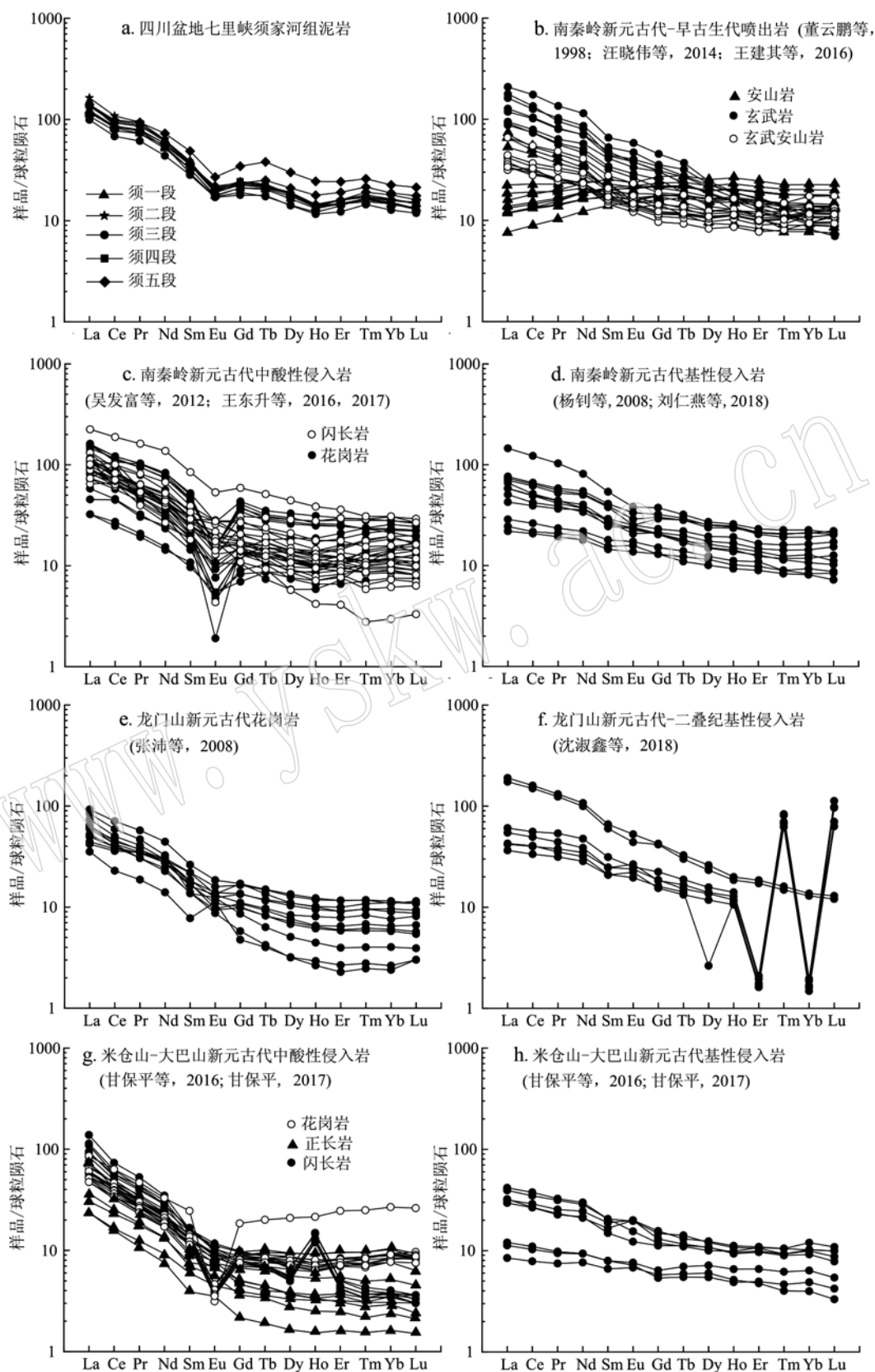


图7 七里峡剖面须家河组泥岩与周缘岩体稀土元素配分模式

Fig.7 The REE distribution patterns of mudstone of Xujiache Formation in Qilixia section and surrounding rock mass

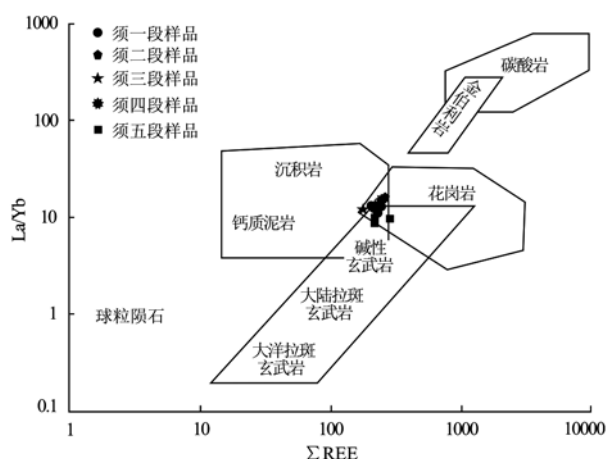


图8 七里峡剖面须家河组泥岩 $\text{La/Yb}-\text{REE}$ 图解
(据 Allègre and Minster, 1978)

Fig. 8 $\text{La/Yb}-\Sigma\text{REE}$ diagram of Xujiache Formation in Qilixia section (modified after Allègre and Minster, 1978)

损,其中 Sr 元素异常亏损。稀土元素含量高,轻稀土元素富集,重稀土元素平坦, Eu 呈负异常, Ce 呈正异常。

(2) 通过对 Li、Sr、Ni、Ga 元素含量的分析,推断七里峡地区须家河组总体属于淡水-微咸水沉积环境。此外,根据 Sr/Ba 值可知水体盐度大小变化为须一段 > 须三段 > 须二段 > 须五段 > 须四段,总体呈下降趋势,推测是因为须一段处于海陆过渡相,而其他层段为陆相环境所导致。古氧化还原参数指标 $V/(\text{Ni} + V)$ 、 Ce_{anom} 显示七里峡地区须家河组沉积期水体为缺氧的还原环境,且须一至须五段还原性逐渐减弱。对 FeO/MnO 值进行分析,再结合粘土矿物含量分布可以判断七里峡地区须家河组沉积时期的气候条件总体上为温暖潮湿,但须三、五段气候条件相比须一、二、四段更为温湿。

(3) 根据地球化学分析七里峡地区须家河组源岩在早期(如须一段、须二段)主要来自南秦岭地区闪长岩、花岗岩和玄武岩的混合,部分来自龙门山地区的花岗岩,晚期物质来源以米仓山-大巴山花岗岩为主。

致谢 本次野外样品采集工作以及文章的完成得到谢奋权、刘帅、宋南南、杨志辉、高运志的大力支持和热情帮助,匿名审稿人进行了认真审阅并提出建设性意见,在此深表感谢!

References

- Allègre C J. 1978. Quantitative models of trace planet[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 38(1): 1 ~ 25.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 91(6): 611 ~ 627.
- Bhatia M R and Taylor S R. 1981. Trace element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. *Chem. Geol.*, 33(1/2): 115 ~ 125.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite studies[A]. *Developments in Geochemistry*[C]. 63 ~ 114.
- Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chengshan, *et al.* 2010. Minerals of the Middle Jurassic-Lower Cretaceous in the Guangyuan area, northern Sichuan: Implications to paleoclimate[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 30(1): 41 ~ 46(in Chinese).
- Chamley H. 1989. *Clay Sedimentology*[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- Dai Chaocheng, Ren Junping, Rao Qiang, *et al.* 2018. Paleosalinity of the Xujiache Formation in central Sichuan basin and its geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 24(3): 390 ~ 400(in Chinese).
- Dai Chaocheng, Zheng Rongcai, Ren Junping, *et al.* 2014. Provenance analysis of Xujiache Formation of Upper Triassic in Sichuan foreland basin and its geology implications[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(4): 1 085 ~ 1 096(in Chinese).
- Dan Yong, Lin Liangbiao, Zhong Yijiang, *et al.* 2013. The conglomerate composition of the fourth member of Xujiache Formation, Upper Triassic, in the front of Micang-Daba Mountains, Sichuan, China: Implication for provenance analysis[J]. *Geological Review*, 59(1): 15 ~ 23(in Chinese with English abstract).
- Deng Kangling, He Li, Qin Dayou, *et al.* 1982. Early stage of Late Triassic strata and sedimentary environment in the western Sichuan Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 3: 204 ~ 210(in Chinese).
- Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, Zhang Guowei, *et al.* 1998. Geochemical characteristics and tectonic implications of the Early Paleozoic basic volcanic rocks in the southern margin of the Qinling orogenic belt[J]. *Geochimica*, 27(5): 432 ~ 441(in Chinese).
- Gan Baoping. 2017. Neoproterozoic Alkaline Complex in the Northern Yangtze Block, Micangshan Mountains Area: Geochemical Significa-

- nances and Geological Implications[D]. Northwest University (in Chinese).
- Gan Baoping, Lai Shaocong, Qin Jiangfeng, *et al.* 2016. Petrogenesis and Implications for the Neoproterozoic Monzogranite in Pinghe, Micang Mountain[J]. Geological Review, 62(4): 929 ~ 944 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhengwu. 1996. Formation and Evolution of the Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hatch J R and Leventhal J S. 1992. 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, USA[J]. Chemical Geology, 99(1/3): 65 ~ 82.
- Lei Kaiyu, Liu Chiyang, Zhang Long, *et al.* 2017. Element geochemical characteristics of the Jurassic mudstones in the northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources and paleoenvironment restoration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35(3): 621 ~ 636 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijing, Jiang Hongxia, Wu Yasheng, *et al.* 2014. Community replacement sequences and paleoenvironmental changes in reef areas of South China from Late Permian to Early Triassic exemplified by Panlongdong section in northeastern Sichuan Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 44(4): 617 ~ 633 (in Chinese).
- Liu Qingjun, Lin Hailiang, Ke Bailin, *et al.* 2014. Geochemical characteristics of Permian Shanxi Formation mudstones in Beijing and their geological significance[J]. Acta Petrologica et mineralogica, 33(3): 491 ~ 502 (in Chinese with English abstract).
- Liu Renyan, Li Qingshan and Niu Baogui. 2018. Geochemical characteristics and tectonic implications of the Xiaomaoling composite intrusives in South Qinling Orogenic Belt[J]. Acta Geoscientia Sinica, 39(2): 201 ~ 215 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhaosheng, Li Liqin, Wang Yongdong, *et al.* 2015. Late Triassic spore-pollen assemblage from the Xujiahe Formation in Hechuan of Chongqing, China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 54(3): 279 ~ 304 (in Chinese).
- Prudeno M J, Figueiredo M O and Cabral J M. 1989. Rare Earth distribution and its correlation with clay mineralogy in the clay-sized fraction of cretaceous and Pliocene sediments (central Portugal)[J]. Clay Minerals, 24(1): 67 ~ 74.
- Qin Yunshan. 1987. East China Sea Geology[M]. Beijing: Science Press, 12 ~ 14 (in Chinese).
- Rimmer S M, Thompson J A, Goodnight S A, *et al.* 2004. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: Geochemical and petrographic evidence[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 215(1/2): 125 ~ 154.
- Shao Longyi, Lu Jing, Ran Longming, *et al.* 2008. Late Triassic sequence stratigraphy and coal accumulation in Baoding Basin of Sichuan Province[J]. Journal of Palaeogeography, 10(4): 355 ~ 361 (in Chinese).
- Shen Shuxin, Jia Dong, Zeng Qing, *et al.* 2018. Baddeleyite U-Pb geochronology of Maliucun diabase from Tangwangzhai-Yangtianwo syncline in the northern segment of Longmen Mountain, Sichuan, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 37(5): 840 ~ 852 (in Chinese with English abstract).
- Shi Jing, Huang Wenhui, Lü Chenhang, *et al.* 2018. Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Paleozoic mudstones from Linxing area in Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(8): 876 ~ 889 (in Chinese).
- Shi Wei, Dong Shuwen, Hu Jianmin, *et al.* 2007. Superimposed structural deformation analysis and tectonic stress field characteristics of the western part of the Daba Mountain[J]. Acta Geologica Sinica, 81(10): 1314 ~ 1327 (in Chinese).
- Shi Zhensheng, Wang Xiuqin and Wu Changjiang. 2011. The heavy minerals and provenances of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 22(4): 618 ~ 627 (in Chinese).
- Sun Chunyan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, *et al.* 2018. Sedimentary characteristics and favorable reservoir facies distribution of the Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin[J]. Oil and Gas Geology, 39(3): 498 ~ 512 (in Chinese).
- Tan Cong, Yu Bingsong, Ruan Zhuang, *et al.* 2017. High-resolution sequence stratigraphy research for Xujiahe Formation of the Upper Triassic series in Sichuan Basin[J]. Geoscience, 31(2): 290 ~ 301 (in Chinese).
- Taylor S R and Mclenman S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1 ~ 301.
- Tian Jingchun and Zhang Xiang. 2017. Sedimentary Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Dongsheng, Wang Zongqi, Wang Tao, *et al.* 2016. Geochemical and geochronological characteristics of Tangjiagou tonalites in the South Qinling[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 36(2): 71 ~ 81 (in Chinese).
- Wang Dongsheng, Wang Zongqi, Wu Yudong, *et al.* 2017. Zircon

- SHRIMP U-Pb Age and Geochemical Characteristics of Syenogranite in the Suizhou Area, South Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 1 007 ~ 1 021(in Chinese).
- Wang Jianqi, Yang Zhao, Dong Yunpeng, *et al.* 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb Age and geochemistry of the Chengkou Volcanic Rocks, South Qinling: Implications for Neoproterozoic Evolution of the Northern Margin of Yangtze Block[J]. *Geological Review*, 62(2): 491 ~ 501(in Chinese with English abstract).
- Wang Quanwei, Kan Zehong, Liu Xiaohu, *et al.* 2008. The Mesozoic Sporopollen Assemblage in the Sichuan Basin and Its Significance to Paleovegetation and Paleoclimate[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 28(2): 89 ~ 95(in Chinese).
- Wang Shufang, Dong Dazhong, Wang Yuman, *et al.* 2014. Geochemistry evaluation index of redox-sensitive elements for depositional environments of Silurian Longmaxi organic-rich shale in the south of Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 19(3): 27 ~ 34(in Chinese).
- Wang Xiaowei. 2014. Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Volcanic Rocks from Mianlue Suture Zone(Zhongtangou-Guozhen), South Qinling[D]. Chang'an University(in Chinese).
- Wu Fafu, Wang Zongqi, Wang Tao, *et al.* 2012. SHRIMP Zircons U-Pb ages and geochemical characteristics of the Banbanshan K-feldspar granite Shanyang, Southern Qinling orogenic belt[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 32(2): 63 ~ 73(in Chinese).
- Xie Jirong, Li Guohui and Tang Dahai. 2006. Analysis of the source supply system of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 29(4): 1 ~ 3, 13, 71(in Chinese).
- Xu Zhaohui, Wang Zecheng, Hu Suyun, *et al.* 2010. Paleoclimate during depositional period of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 12(4): 415 ~ 424(in Chinese).
- Yang Zhao, Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, *et al.* 2008. Geochemistry and geologic significance of basic rocks in the Xiaomoling complex in the Zhashui area, South Qinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(5): 611 ~ 617(in Chinese).
- Zhang Chao. 2017. Discussion on provenance of Xujiahe Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. *Technology Innovation and Application*, (36): 180, 182(in Chinese).
- Zhang Pei, Zhou Zuyi, Xu Changhai, *et al.* 2008. Geochemistry of Pengguan Complex in the Longmenshan Region, Western Sichuan Province, SW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 105 ~ 116(in Chinese).
- Zhang Qian, Wang Jian, Yu Qian, *et al.* 2017. Geochemical features and paleoenvironment of shales in Longmaxi Formation of complicated structure area, Southwestern Sichuan Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 38(4): 399 ~ 406(in Chinese).
- Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, *et al.* 2009. Sequence-lithographic paleogeographic characteristics of the Xujiahe Formation in the Sichuan foreland basin[J]. *Geological Review*, 55(4): 484 ~ 495(in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai and Liu Meiqing. 1999. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in ordos basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 20(1): 22 ~ 27(in Chinese).
- Zhou Xiaofeng, Chen Bo, Fan Rui, *et al.* 2016. Provenance analysis of 4th Member of Xujiahe Formation in northern Sichuan Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 23(3): 279 ~ 283(in Chinese).

附中文参考文献

- 曹 珂, 李祥辉, 王成善等. 2010. 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*, 30(1): 41 ~ 46.
- 戴朝成, 任军平, 饶 强, 等. 2018. 四川盆地川中地区须家河组古盐度特征及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 24(3): 390 ~ 400.
- 戴朝成, 郑荣才, 任军平, 等. 2014. 四川前陆盆地上三叠统须家河组物源区分析及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(4): 1 085 ~ 1 096.
- 淡 永, 林良彪, 钟怡江, 等. 2013. 米仓山-大巴山前缘上三叠统须家河组四段砾岩特征及其对物源的指示[J]. *地质论评*, 59(1): 15 ~ 23.
- 邓康龄, 何 鲤, 秦大有, 等. 1982. 四川盆地西部晚三叠世早期地层及其沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 3(3): 204 ~ 210.
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 1998. 秦岭造山带南缘早古生代基性火山岩地球化学特征及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 27(5): 432 ~ 441.
- 甘保平. 2017. 扬子北缘米仓山地区新元古代碱性杂岩地球化学特征及地质意义[D]. 西北大学.
- 甘保平, 赖绍聪, 秦江锋. 2016. 米仓山坪河新元古代二长花岗岩成因及其地质意义[J]. *地质论评*, 62(4): 929 ~ 944.
- 郭正吾. 1996. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 雷开宇, 刘池洋, 张 龙, 等. 2017. 鄂尔多斯盆地北部侏罗系泥岩地球化学特征: 物源与古沉积环境恢复[J]. *沉积学报*, 35(3): 621 ~ 636.
- 刘丽静, 姜红霞, 吴亚生, 等. 2014. 中国南方晚二叠世-早三叠世礁区生物群落演替序列与古环境变化——以四川盆地东北部盘龙

- 洞剖面为例[J]. 中国科学: 地球科学, 44(4): 617~633.
- 刘清俊, 林海亮, 柯柏林, 等. 2014. 北京周边二叠系山西组泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(3): 491~502.
- 刘仁燕, 李清山, 牛宝贵, 等. 2018. 南秦岭小茅岭复式岩体地球化学特征及其构造意义[J]. 地球学报, 39(2): 201~215.
- 刘兆生, 李丽琴, 王永栋. 2015. 重庆合川地区晚三叠世须家河组孢粉组合[J]. 古生物学报, 54(3): 279~304.
- 秦蕴珊. 1987. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 12~14.
- 邵龙义, 鲁静, 冉隆明, 等. 2008. 四川宝鼎盆地晚三叠世层序地层与聚煤作用[J]. 古地理学报, 10(4): 355~361.
- 沈淑鑫, 贾东, 曾庆, 等. 2018. 四川龙门山北段唐王寨-仰天窝向斜麻柳村辉绿岩斜锆石 U-Pb 同位素定年及其地质意义[J]. 地质通报, 37(5): 840~852.
- 师晶, 黄文辉, 吕晨航, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界泥岩地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报, 39(8): 876~889.
- 施炜, 董树文, 胡健民, 等. 2007. 大巴山前陆西段叠加构造变形分析及其构造应力场特征[J]. 地质学报, 81(10): 1314~1327.
- 施振生, 王秀芹, 吴长江. 2011. 四川盆地上三叠统须家河组重矿物特征及物源区意义[J]. 天然气地球科学, 22(4): 618~627.
- 孙春燕, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 2018. 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积特征及有利储集相带[J]. 石油与天然气地质, 39(3): 498~512.
- 谭聪, 于炳松, 阮壮, 等. 2017. 四川盆地上三叠统须家河组高分辨率层序地层研究[J]. 现代地质, 31(2): 290~301.
- 田景春, 张翔. 2016. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 王东升, 王宗起, 王涛, 等. 2016. 南秦岭唐家沟英云闪长岩年代学及岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 36(2): 71~81.
- 王东升, 王宗起, 武昱东, 等. 2017. 南秦岭随州地区正长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学与地球化学特征[J]. 地质学报, 91(5): 1007~1021.
- 王建其, 杨钊, 董云鹏, 等. 2016. 南秦岭城口火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和地球化学研究[J]. 地质论评, 62(2): 491~501.
- 王全伟, 阚泽忠, 刘啸虎, 等. 2008. 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, 28(2): 89~95.
- 王淑芳, 董大忠, 王玉满, 等. 2014. 四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J]. 海相油气地质, 19(3): 27~34.
- 汪晓伟. 2014. 南秦岭勉略构造带(中堂沟-郭镇段)火山岩岩石地球化学特征及其构造意义[D]. 西安: 长安大学.
- 吴发富, 王宗起, 王涛, 等. 2012. 南秦岭山阳板板山钾长花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 矿物岩石, 32(2): 63~73.
- 谢继容, 李国辉, 唐大海. 2006. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. 天然气勘探与开发, (4): 1~3, 13, 71.
- 徐兆辉, 汪泽成, 胡素云, 等. 2010. 四川盆地上三叠统须家河组沉积时期古气候[J]. 古地理学报, 12(4): 415~424.
- 杨钊, 董云鹏, 周鼎武, 等. 2008. 南秦岭柞水地区小磨岭杂岩基性岩类的地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 27(5): 611~617.
- 张超. 2017. 四川盆地东部须家河组物源分析探讨[J]. 科技创新与应用, (36): 180, 182.
- 张沛, 周祖翼, 许长海, 等. 2008. 川西龙门山彭灌杂岩地球化学特征: 岩石成因与构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 32(1): 105~116.
- 张茜, 王剑, 余谦, 等. 2017. 川西南构造复杂区龙马溪组泥页岩地球化学特征及古环境[J]. 新疆石油地质, 38(4): 399~406.
- 郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 等. 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序-岩相古地理特征[J]. 地质论评, 55(4): 484~495.
- 郑荣才, 柳梅青. 1999. 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, 20(1): 22~27.
- 周晓峰, 陈波, 凡睿, 等. 2016. 四川盆地北部须家河组四段物源体系分析[J]. 断块油气田, 23(3): 279~283.