

鄂西南利川三叠纪须家河组地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示^{*}

田洋 赵小明 王令占 涂兵 谢国刚 曾波夫

TIAN Yang, ZHAO XiaoMing, WANG LingZhan, TU Bing, XIE GuoGang and ZENG BoFu

武汉地质矿产研究所, 武汉 430205

Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, China

2014-04-06 收稿, 2014-09-15 改回.

Tian Y, Zhao XM, Wang LZ, Tu B, Xie GG and Zeng BF. 2015. Geochemistry of clastic rocks from the Triassic Xujiahe Formation, Lichuan area, southwestern Hubei: Implications for weathering, provenance and tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 261–272

Abstract Petrography, major, trace and rare earth element compositions of clastic rocks from Upper Triassic Xujiahe Formation, Lichuan area, southwestern Hubei Province, have been investigated to determine their weathering condition, provenance and tectonic setting. All sandstone samples are enriched in quartz (average 76.23%), but poor in lithic fragment (average 7.08%) and feldspar (average 4.88%). The mean value of $Q/(Q+F+L)$ is 0.86. Heavy mineral assemblage constituted by zircon, brookite, magnetite and tourmaline supported an acidic or low-grade metamorphic source. The sandstones are characterized by high SiO_2 (77.14% ~ 92.79%, average 84.14%), Al_2O_3 (3.86% ~ 14.15%, average 9.69%) content, low $(Fe_2O_3^T + MgO)^*$ (0.98% ~ 3.20%, average 1.50%), TiO_2^* (0.09% ~ 1.09%, average 0.39%) content, low Al_2O_3/SiO_2 (0.04 ~ 0.18, average 0.12) and high K_2O/Na_2O (4.90 ~ 82.41, average 40.01) ratio, which is similar to the characteristic of passive continental margin. High field strength and large-ion lithophile elements contents in sediments from Xujiahe Formation are similar to that of the upper crust. ΣREE contents of clastic rocks are $62 \times 10^{-6} \sim 495 \times 10^{-6}$ with an average of 181×10^{-6} , $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ ratios are 7.74 ~ 18.27 with an average of 13.51. As similar to upper crust REE pattern, chondrite-normalized REE patterns of samples show enrich LREE, flat HREE, moderate Eu ($Eu/Eu^* = 0.53 \sim 0.79$, average 0.61) and Ce ($Ce/Ce^* = 0.55 \sim 1.09$, average 0.79) negative anomalies. Part characteristic contents and ratios of trace and rare earth elements in sandstones, such as: Th, La, Ce, Rb/Sr, Th/U and La/Sc, hinted that the tectonic background were passive and active continental margin. Compositional variation index ICV (0.18 ~ 0.68, average 0.45) implied the source material were mainly recycled sediments. Sediment recirculation could cause clay minerals increased, then make CIA (chemical weathering index) accumulated. The value of CIA (72.10 ~ 96.28, average 81.18) demonstrated that these sediments accumulatively experienced intense chemical weathering. Meanwhile, strong negative correlation between CIA and ICV indicated that the variation of CIA is mainly caused by clastic input with different composition during sedimentary period. In combination with provenance, tectonic discrimination diagrams, these characteristics all above suggested Xujiahe Formation deposited under tectonic settings of passive (main setting) and active continental margin, and its provenances were from Xuefeng paleo-uplift area (main source) and Qinling orogenic belt.

Key words Clastic rocks; Geochemistry; Weathering; Provenance; Tectonic setting; Xujiahe Formation; Southwestern Hubei

摘要 鄂西南利川地区三叠纪须家河组砂岩碎屑颗粒富石英(Q), 贫岩屑(L)与长石(F), 平均值分别为: 76.23%、7.08%与4.88%, $Q/(Q+F+L)$ 平均值为0.86, 具有锆石-板钛矿-磁铁矿-电气石重矿物组合, 指示源岩以酸性岩或低级变质岩为主。砂岩主量元素 SiO_2 含量高(77.14% ~ 92.79%, 平均84.14%), Al_2O_3 次之(3.86% ~ 14.15%, 平均9.69%), $(Fe_2O_3^T + MgO)^*$ (0.98% ~ 3.20%, 平均1.50%)、 TiO_2^* (0.09% ~ 1.09%, 平均0.39%) 含量低, Al_2O_3/SiO_2 比值低(0.04 ~ 0.18, 平均0.12), K_2O/Na_2O 比值高(4.90 ~ 82.41, 平均40.01), 最接近被动大陆边缘特征值。样品具有与上地壳相似的高场

* 本文受国家自然科学基金项目(41240016)和中国地质调查局基础地质调查项目(1212010911016、12120113063200)联合资助。

第一作者简介: 田洋, 男, 1984年生, 硕士, 沉积学专业, E-mail: 41834572@qq.com

强元素与大离子亲石元素组成, ΣREE 分布于 $62 \times 10^{-6} \sim 495 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 181×10^{-6} , 球粒陨石标准化配分型式与上地壳极为相似, 呈现轻稀土富集、重稀土平坦、中度 Eu、Ce 负异常特征, 特征微量、稀土元素含量及比值, 如: Th/La、Ce/Rb/Sr、Th/U、La/Sc, 指示了晚三叠世构造背景为被动与活动大陆边缘。样品成分变异指数 ICV 均 < 1 (0.18 ~ 0.68, 平均 0.45), 指示物源主要为再循环的沉积物, 而沉积物再循环会导致粘土矿物比例增加, 从而使化学风化指标 CIA 值得到累积。较高的 CIA 值 (72.10 ~ 96.28, 平均 81.18) 表明沉积物累积经历的化学风化作用强烈, 而 CIA 与 ICV 强烈负相关, 则表明 CIA 值的变化主要是由不同时期输入碎屑物成分不同引起的。结合物源、构造背景判别图解, 上述特征综合表明研究区须家河组形成于被动大陆边缘(为主)与活动大陆边缘环境, 其物源来自东南的雪峰隆起区(为主)与北侧的秦岭造山带。

关键词 碎屑岩; 地球化学; 风化作用; 物源; 构造背景; 须家河组; 鄂西南

中图法分类号 P588.212

碎屑沉积岩对于研究物源区组成、地质演化、风化程度及构造背景具有不可替代的作用 (Taylor and McLennan, 1985), 尤其是在火成岩缺乏的地区, 如: 俗称的“扬子陆块”, 而对于碎屑沉积岩的研究主要集中于岩石学和地球化学方面。岩石学方面, Dickinson and Suczek (1979) 提出了砂岩骨架组成与构造环境的关系, 按不同的板块构造单元特点划分出 3 个一级物源区和 9 个次级物源区, 之后该模型未得到深入改进。地球化学方面, 是利用一些特征元素含量、比值、多变量判别图解与判别方程来指示物源与构造背景, 如: 风化过程中难迁移的微量 (Th、Sc、Zr 等)、稀土元素及相应比值 (La/Sc、La/Th、Th/Co 等) (Bhatia and Crook, 1986; Armstrong-Altrin *et al.*, 2004), 主量元素 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (Rosser and Korsch, 1986) 判别图解及多变量判别方程 (Bhatia, 1983; Rosser and Korsch, 1988)。由于碎屑颗粒组成统计的不确定性 (Fedó *et al.*, 1997) 及测试精度与地球化学研究手段的提高, 越来越多的地质工作者逐渐倾向于使用地球化学方法进行物源与构造背景研究 (McLennan and Taylor, 1991; Cullers, 2000; Yan *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2004; Rashid, 2005; 李双应等, 2005; 张金亮和张鑫, 2007; Dostal and Keppie, 2009; 张英利等, 2011; Yang *et al.*, 2012; 杨栋栋等, 2012)。

扬子陆块自埃迪卡拉纪到二叠纪为一个稳定的古地理单元, 而且多数时间沉积浅水碳酸盐岩, 发生在三叠纪的印支运动—“表现为华北板块向南强烈挤压, 秦岭造山带大规模隆升, 华夏地块强烈北西向挤压以及印支板块向北的挤压”, 结束了这一海相沉积历史 (梅冥相, 2010; Wang *et al.*, 2013)。晚三叠世须家河组就是在这一构造背景下形成的一套碎屑岩沉积。目前, 对川-渝-鄂西南地区须家河组碎屑岩物源与构造背景的探讨主要是采用古水流、砂砾岩等厚图、重矿物组合及碎屑组分 Dickinson 判别图解 (林良彪等, 2006; 施振生等, 2010; 淡永等, 2013) 等传统的地质方法来实施的, 本文在前人研究基础上, 综合碎屑岩颗粒组成与地球化学特征, 对鄂西南利川地区须家河组碎屑岩风化程度、物源及构造背景进行了系统探讨。

1 地质背景

研究区位于湖北省西南部利川市, 剖面位于利川市西南

约 40km 的忠路镇颜家沟村, 起点坐标: $\text{E}108^\circ 41' 12''$, $\text{N}30^\circ 05' 14''$ (下文简称“忠路剖面”, 图 1a, b), 构造位置属中扬子陆块川东构造带 (Yan *et al.*, 2003)。须家河组广泛出露于川-渝-鄂西地区, 岩性稳定, 唯称谓及时代跨度有所不同, 如: 四川盆地须家河组跨诺利期与瑞替期, 而到了鄂西宜昌地区称为沙镇溪组, 沉积时代属于晚瑞替期 (梅冥相, 2010)。忠路剖面须家河组底部为灰绿色页片状泥岩夹中层状细砂岩, 泥岩中产丰富植物化石, 向上为灰白、灰绿色厚层至块状粗-中粒岩屑石英砂岩、长石石英砂岩、石英砂岩与灰绿色中层状细粒岩屑石英砂岩、长石石英砂岩, 夹灰绿色薄层状 (碳质) 泥岩及薄煤层, 砂岩平行层理, 槽状、板状、楔状交错层理发育, 平行不整合于中三叠世巴东组三段之上, 整合于侏罗纪自流井组之下 (图 1c)。

2 样品采集与分析

本次研究采集新鲜样品, 以降低风化作用的影响。砂岩碎屑组成在偏光显微镜下进行统计, 由于忠路剖面砂岩薄片样品较少, 故补采其北东侧三叉河剖面砂岩样品 (图 1b)。碎屑岩组成统计采用点计数法 (Dickinson, 1985)。统计内容为: 石英颗粒总数 Q_t , 包括单晶石英 Q_m 与多晶石英 Q_p ; 长石颗粒总数 F , 包括斜长石 P 和钾长石 K ; 不稳定岩屑总数 L , 包括火成岩岩屑 L_s 与沉积岩或变质岩岩屑 L_d , 由于镜下未见火成岩岩屑, 因此 $L = L_s$; 所有岩屑总数 $L_t = L + Q_p$ 。另外, 镜下常见长石被高岭石、绢云母部分交代, 但晶形保留, 双晶可辨, 将其整体计为长石颗粒, 陆源白云母计入沉积岩岩屑。地球化学样品加工及测试在国土资源部中南资源矿产监督检测中心完成, 首先将样品无污染粉碎至 200 目干燥后备用, 全岩主量元素在 X 射线荧光光谱仪 (AXIOS) 上测试, 微量元素与稀土元素在电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS-X Series II) 上进行分析, 测试精度优于 5%。

3 分析结果

3.1 砂岩碎屑颗粒特征

须家河组砂岩主要为长石石英砂岩与岩屑石英砂岩, 碎

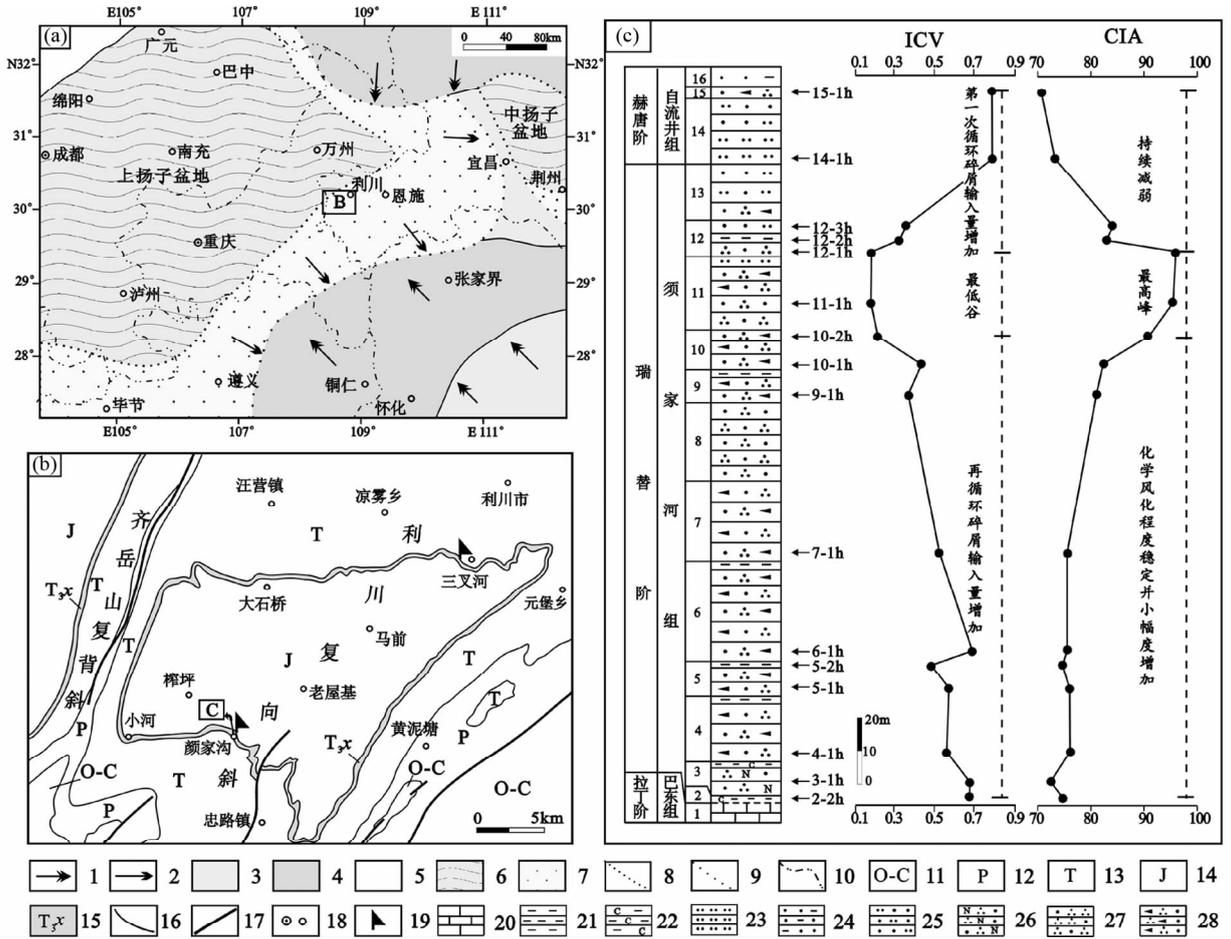


图1 研究区及邻区晚三叠世瑞替期沉积盆地格局(a, 据梅冥相, 2010)、研究区地质简图(b)和忠路剖面采样点图(c)

1-构造块体主运动方向;2-瑞替期盆地超覆方向;3-中三叠世前形成的隆起区域;4-早三叠世前形成的隆起区域;5-诺利期形成的隆起区域;6-瑞替早期陆相盆地;7-瑞替晚期陆相盆地;8-瑞替早期陆相盆地边界;9-瑞替晚期陆相盆地边界;10-省界;11-奥陶系-石炭系;12-二叠系;13-三叠系;14-侏罗系;15-须家河组;16-地层界线;17-断层线;18-地名点;19-剖面位置;20-灰岩;21-泥岩;22-碳质泥岩;23-粉砂岩;24-泥质砂岩;25-粉砂质细砂岩;26-石英砂岩;27-长石石英砂岩;28-岩屑石英砂岩

Fig. 1 Outline map showing the distribution pattern of sedimentary basin for the Late Triassic Rhaetian in the study area and its adjacent areas (a, after Mei, 2010), geological sketch map of study area (b) and sample location along Zhonglu section (c)

屑颗粒平均含量为 88.19%，石英含量 51% ~ 89%，平均为 76.23%。其中单晶石英：次棱角状-次圆状，弱重结晶，平均含量 61.73%；石英岩：次圆状，含量 2% ~ 20%，平均为 9.54%；硅质岩：次棱角状为主，隐晶-微晶结构，含量 1% ~ 15%，平均为 4.96%。长石：次棱角状-次圆状，常被其他矿物不完全交代，但晶形及双晶可辨，平均 4.88%。其中钾长石：强烈粘土矿物化（高岭石化），见条纹双晶，偶见文象结构，含量 0% ~ 6%，平均 1.96%；斜长石：多绢云母化，见聚片双晶，含量 0% ~ 8%，平均 2.92%；与三峡河剖面不同的是，忠路剖面钾长石含量高于斜长石。岩屑均为泥质岩，具显微鳞片结构，呈不规则团块充填于石英、长石颗粒之间，含量主要变化于 0% ~ 14% 之间，平均 7.08%。Q/(Q + F + L) 平均值为 0.86， Q_m/Q 为 0.69 ~ 0.96，平均 0.81，表明碎屑颗粒石英占主体，且以单晶石英为主。另外，砂岩普遍具有锆

石-板钛矿-磁铁矿-电气石的重矿物组合，不同的重矿物组合往往是不同母岩类型的反映，依照施振生等(2010)对四川盆地上三叠统碎屑岩重矿物组合与母岩类型对应关系的研究成果，该重矿物组合指示源岩主要为酸性岩或低级变质岩。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素特征

如表 1 所示，忠路剖面须家河组砂岩 SiO_2 含量较高，为 77.14% ~ 92.79%，平均为 84.14%，表明砂岩中石英或富含 SiO_2 的矿物含量较高，这与薄片鉴定结果一致； Al_2O_3 含量次之，分布于 3.86% ~ 14.15% 之间，平均为 9.69%，而泥岩中 Al_2O_3 含量却很高，为 17.42% ~ 20.21%，平均为 19.24%，表明其含量与泥质沉积物的含量有关。样品 K_2O 含量为 0.35% ~ 5.88%，平均 2.33%， CaO 含量低，为 0.16% ~

表 1 利川忠路剖面须家河组碎屑岩主量元素分析结果 (wt%)

Table 1 Major element contents of clastic rocks from Xujiahe Formation at Zhonglu section (wt%)

样品号	2-2h	3-1h	4-1h	5-1h	5-2h	6-1h	7-1h	9-1h	10-1h	10-2h	11-1h	12-2h	12-3h	14-1h	15-1h	须家河组(平均值)		
岩性	泥岩	砂岩	砂岩	砂岩	泥岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	泥岩	砂岩	砂岩	砂岩	样品	泥岩	
SiO ₂	65.36	81.64	84.99	85.73	66.54	92.79	85.72	84.98	87.20	78.52	83.89	82.89	77.14	81.58	81.62	80.40	84.14	66.68
Al ₂ O ₃	17.42	9.86	8.67	8.35	20.10	3.86	8.61	9.55	7.81	13.91	10.53	11.27	14.15	9.04	8.87	11.74	9.69	19.24
Fe ₂ O ₃ ^T	4.26	2.74	1.71	1.68	1.53	1.15	1.31	0.89	1.16	0.76	0.85	0.93	1.00	0.99	3.10	1.50	1.29	2.26
Fe ₂ O ₃	3.40	1.70	0.18	0.39	0.79	0.09	0.01	0.06	0.05	0.42	0.18	0.37	0.63	0.37	0.34	0.62	0.35	1.61
FeO	0.77	0.94	1.38	1.16	0.67	0.95	1.17	0.74	1.00	0.31	0.60	0.50	0.33	3.02	2.48	0.79	0.85	0.59
CaO	0.370	0.342	0.290	0.350	0.393	0.164	0.314	0.274	0.282	0.242	0.208	0.310	0.206	0.338	0.490	0.29	0.28	0.32
MgO	1.150	0.397	0.187	0.190	0.710	0.100	0.146	0.120	0.103	0.195	0.089	0.077	0.555	0.360	0.648	0.31	0.18	0.81
K ₂ O	5.100	2.350	2.450	2.390	5.880	1.110	2.460	1.910	1.450	1.080	0.399	0.345	3.470	2.230	1.150	2.33	1.65	4.82
Na ₂ O	0.154	0.480	0.036	0.029	0.144	0.022	0.035	0.048	0.042	0.047	0.020	0.019	0.132	0.078	1.100	0.09	0.08	0.14
TiO ₂	0.764	0.319	0.232	0.171	1.140	0.086	0.242	0.316	0.339	0.692	0.333	0.307	1.180	1.090	0.488	0.52	0.38	1.03
P ₂ O ₅	0.040	0.058	0.017	0.017	0.032	0.010	0.016	0.016	0.017	0.040	0.014	0.017	0.049	0.020	0.081	0.03	0.02	0.04
MnO	0.009	0.013	0.011	0.013	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.009	0.006	0.009	0.005	0.007	0.030	0.01	0.01	0.01
灼失	5.26	1.75	1.37	1.05	3.36	0.69	1.10	1.83	1.55	4.41	3.61	3.80	4.88	2.08	2.42	2.72	2.24	4.50
总和	99.80	99.85	99.81	99.84	99.77	99.89	99.83	99.86	99.85	99.87	99.89	99.91	99.80	99.81	99.61	99.84	99.85	99.79
TiO ₂ [*]	0.81	0.33	0.24	0.17	1.18	0.09	0.25	0.32	0.34	0.72	0.35	0.32	1.24	1.13	0.50	0.53	0.39	1.08
(Fe ₂ O ₃ ^T + MgO) [*]	5.72	3.20	1.93	1.89	2.32	1.26	1.47	1.03	1.28	1.00	0.98	1.04	1.64	4.26	3.85	1.87	1.50	3.23
K ₂ O/(CaO + Na ₂ O)	9.73	2.86	7.52	6.31	10.95	5.97	7.05	5.93	4.48	3.74	1.75	1.05	10.27	5.36	0.86	5.92	4.73	10.32
K ₂ O/Na ₂ O	33.12	4.90	68.06	82.41	40.83	50.45	70.29	39.79	34.52	22.98	19.95	18.16	26.29	28.59	1.05	38.60	40.01	33.41
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.27	0.12	0.10	0.10	0.30	0.04	0.10	0.11	0.09	0.18	0.13	0.14	0.30	0.18	0.11	0.15	0.12	0.29
ICV	0.68	0.67	0.57	0.58	0.49	0.68	0.52	0.37	0.43	0.22	0.18	0.18	0.32	0.36	0.79	0.45	0.43	0.50
CIA	74.30	72.10	75.78	75.69	74.61	75.19	75.61	81.10	82.06	91.31	95.49	96.28	82.83	84.12	73.26	81.18	82.25	77.25
F1	-4.30	-4.60	-6.02	-6.03	-5.69	-7.42	-6.32	-5.51	-5.80	-2.74	-3.12	-2.43	-3.04	-4.70	-3.54	-4.84	-4.97	-4.34
F2	-0.02	-2.96	-3.12	-3.23	2.63	-5.27	-2.95	-3.50	-4.32	-4.28	-5.60	-5.60	-0.57	-2.60	-4.29	-2.96	-3.95	0.68
F3	-3.51	-3.05	-3.29	-3.36	-3.39	-3.65	-3.34	-3.46	-3.52	-3.47	-3.47	-3.43	-3.38	-3.84	-1.74	-3.44	-3.44	-3.43
F4	-3.13	-1.71	-3.09	-3.05	-4.57	-0.94	-3.00	-1.35	-0.90	2.12	1.57	1.64	-0.02	0.77	-0.75	-1.12	-0.72	-2.57

注: 样品 2-2h~12-3h 采自须家河组; 14-1h 与 15-1h 采自自流井组; * 表示不含挥发分的含量, 表 3 同; Fe₂O₃^T = Fe₂O₃ + 1.1113 × FeO, 总和不包括 Fe₂O₃^T 含量; F1, F2 函数系数数据 Roser and Kor-
sch, 1988; F3, F4 函数系数数据 Bhatia, 1983

表2 利川忠路剖面须家河碎屑岩微量及稀土元素分析结果($\times 10^{-6}$)Table 2 Trace elements contents of clastic rocks from Xujiahe Formation at Zhonglu section ($\times 10^{-6}$)

样品号 岩性	须家河组(平均值)																			
	2-2h 泥岩	3-1h 砂岩	4-1h 砂岩	5-1h 砂岩	5-2h 泥岩	6-1h 砂岩	7-1h 砂岩	9-1h 砂岩	10-1h 砂岩	10-2h 砂岩	11-1h 砂岩	12-1h 砂岩	12-2h 泥岩	12-3h 砂岩	14-1h 砂岩	15-1h 砂岩	上地壳 样品	泥岩		
Pb	30.90	7.94	11.50	8.21	20.70	12.10	8.66	3.89	20.50	67.90	11.00	11.00	30.30	14.70	12.60	57.30	17.00	18.52	16.13	27.30
Zn	35.40	19.60	18.60	13.00	42.60	16.90	15.00	13.70	12.90	20.60	13.70	14.30	29.50	18.20	41.60	51.80	67.00	20.29	16.05	35.83
Cr	75.70	24.50	20.10	16.50	121.00	16.70	18.00	19.50	12.60	45.10	17.80	16.40	47.50	63.80	32.00	33.60	92.00	36.80	24.64	81.40
Co	2.15	5.50	1.37	1.60	2.58	1.21	2.48	2.09	6.68	2.84	1.93	2.14	4.55	1.59	6.77	8.40	17.30	2.77	2.68	3.09
Rb	257.0	74.70	72.20	71.70	244.0	32.20	70.60	52.00	41.80	45.60	16.10	16.60	156.0	98.30	39.20	36.50	82.00	89.20	53.80	219.0
Sr	65.10	32.00	28.50	22.50	73.80	11.90	19.40	12.70	13.60	23.80	7.67	9.55	50.30	32.80	77.20	60.60	320	28.83	19.49	63.07
V	134.0	30.00	28.60	22.10	136.0	13.40	26.90	27.80	31.70	59.80	25.00	19.20	114.0	95.20	55.20	48.00	97.00	54.55	34.52	128.0
Sc	23.50	7.79	5.86	6.90	30.20	2.11	5.56	5.40	5.21	9.61	5.79	5.96	23.50	12.50	8.54	6.46	14.00	10.71	6.61	25.73
U	11.80	1.34	1.09	1.07	4.47	0.57	1.14	0.87	0.97	2.14	1.98	1.31	3.90	3.31	1.28	1.70	2.70	2.57	1.44	6.72
Th	5.68	6.82	5.61	5.43	21.60	2.76	5.88	8.52	9.31	13.20	8.46	8.32	19.90	11.40	7.44	7.14	10.50	9.49	7.79	15.73
La	31.60	31.50	29.80	27.00	69.20	17.10	36.70	30.30	37.60	137.00	39.40	31.70	99.80	34.20	73.80	36.70	31.00	46.64	41.12	66.87
Ce	48.20	52.90	37.10	35.00	102.00	23.90	56.40	49.20	43.60	210.00	69.80	69.70	187.00	67.50	136.00	68.10	63.00	75.16	65.01	112.40
Pr	4.95	6.05	5.97	5.44	13.40	3.42	8.46	7.44	8.52	23.80	8.04	6.54	20.00	8.85	15.80	8.40	7.10	9.35	8.41	12.78
Nd	13.80	20.10	20.40	18.40	41.80	11.30	29.30	25.10	29.90	78.60	27.40	21.50	64.70	34.00	53.40	31.00	27.00	31.16	28.73	40.10
Sm	1.42	3.09	3.35	3.01	5.59	1.67	4.94	4.21	4.92	13.00	4.72	3.56	10.30	5.89	8.91	5.80	4.70	4.98	4.76	5.77
Eu	0.30	0.52	0.70	0.73	0.99	0.27	0.89	0.75	0.90	2.44	0.84	0.58	1.91	0.97	1.68	1.17	1.00	0.91	0.87	1.07
Gd	1.32	2.41	2.54	2.53	4.93	1.35	3.57	3.09	3.52	11.30	3.63	2.80	9.30	5.02	7.73	5.34	4.00	4.09	3.80	5.18
Tb	0.16	0.32	0.34	0.32	0.80	0.19	0.46	0.38	0.51	1.45	0.48	0.34	1.41	0.89	1.10	0.80	0.70	0.58	0.52	0.79
Dy	1.20	1.73	1.77	1.61	5.25	0.99	2.27	2.04	2.65	6.96	2.40	1.78	8.11	5.38	5.70	4.42	3.90	3.15	2.69	4.85
Ho	0.32	0.34	0.33	0.29	1.14	0.19	0.41	0.37	0.51	1.28	0.46	0.32	1.57	1.04	1.04	0.83	0.83	0.61	0.50	1.01
Er	1.22	1.01	0.97	0.77	3.46	0.49	1.12	1.04	1.42	3.60	1.29	0.83	4.36	2.94	2.80	2.15	2.30	1.75	1.41	3.01
Tm	0.28	0.19	0.17	0.13	0.66	0.09	0.20	0.19	0.25	0.66	0.24	0.14	0.75	0.50	0.47	0.35	0.30	0.32	0.25	0.56
Yb	2.22	1.25	1.14	0.91	4.54	0.59	1.36	1.35	1.68	4.26	1.62	0.97	4.76	3.33	3.04	2.22	1.96	2.14	1.68	3.84
Lu	0.34	0.19	0.17	0.13	0.66	0.08	0.19	0.19	0.23	0.63	0.22	0.13	0.68	0.47	0.42	0.31	0.31	0.31	0.24	0.56
Rb/Sr	3.95	2.33	2.53	3.19	3.31	2.71	3.64	4.09	3.07	1.92	2.10	1.74	3.10	3.00	0.51	0.60	0.26	2.91	2.76	3.45
Th/U	0.48	5.09	5.15	5.07	4.83	4.84	5.16	9.79	9.60	6.17	4.27	6.35	5.10	3.44	5.81	4.20	3.89	5.38	5.90	3.47
La/Th	5.56	4.62	5.31	4.97	3.20	6.20	6.24	3.56	4.04	10.38	4.66	3.81	5.02	3.00	9.92	5.14	2.95	5.04	5.16	4.59
La/Sc	1.34	4.04	5.09	3.91	2.29	8.10	6.60	5.61	7.22	14.26	6.80	5.32	4.25	2.74	8.64	5.68	2.21	5.54	6.34	2.63
Th/Sc	0.24	0.88	0.96	0.79	0.72	1.31	1.06	1.58	1.79	1.37	1.46	1.40	0.85	0.91	0.87	1.11	0.75	1.09	1.23	0.60
Sc/Cr	0.31	0.32	0.29	0.42	0.25	0.13	0.31	0.28	0.41	0.21	0.33	0.36	0.49	0.20	0.27	0.19	0.15	0.31	0.30	0.35
Th/Co	2.64	1.24	4.09	3.39	8.37	2.28	2.37	4.08	1.39	4.65	4.38	3.89	4.37	7.17	1.10	0.85	0.61	3.88	3.54	5.13
Σ REE	107	122	105	96	254	62	146	126	136	495	161	141	415	171	312	168	148	181	160	259
L/H	14.20	15.34	13.10	13.39	10.87	14.51	14.27	13.53	11.65	15.42	14.53	18.27	12.40	7.74	12.99	9.21	9.36	13.51	13.79	12.49
Ce/Ce*	0.82	0.85	0.62	0.65	0.74	0.70	0.73	0.75	0.55	0.80	0.88	1.09	0.94	0.89	0.90	0.88	0.97	0.79	0.77	0.83
Eu/Eu*	0.66	0.56	0.70	0.79	0.56	0.53	0.62	0.61	0.63	0.60	0.60	0.54	0.59	0.53	0.60	0.63	0.69	0.61	0.61	0.60
La/Yb	14.23	25.20	26.14	29.67	15.24	28.98	26.99	22.44	22.38	32.16	24.32	32.68	20.97	10.27	24.28	16.53	15.82	23.69	25.57	16.81
(La/Yb) _N	9.62	17.03	17.66	20.05	10.30	19.59	18.24	15.17	15.12	21.73	16.43	22.08	14.17	6.94	16.40	11.17	10.69	16.01	17.28	11.36
(La/Yb) _{UCC}	0.90	1.59	1.65	1.88	0.96	1.83	1.71	1.42	2.03	1.42	1.54	2.07	1.33	0.65	1.53	1.05	1.00	1.50	1.62	1.06

注: L/H 为轻重稀土比值; 下标 N 表示元素相对于球粒陨石标准化; 下标 UCC 表示元素相对于上陆壳标准化; $Eu/Eu^* = 2 \times Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$; $Ce/Ce^* = 2 \times Ce_N / (La_N + Nd_N)$; 上地壳值参考 Rudnick and Gao, 2003; 球粒陨石值参考 Taylor and McLennan, 1985

0.39%, 平均 0.29%, 与镜下未见碳酸盐矿物这一特点吻合。 Na_2O 含量最高仅为 0.48%, $\text{K}_2\text{O}/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 为 1.05 ~ 10.95, 平均为 5.92, 砂岩的平均值为 4.73, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 4.90 ~ 82.41, 平均为 38.60, 砂岩为 40.01, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (摩尔量之比) 平均值为 25.39, 砂岩中为 26.32, 虽然镜下观察表明忠路剖面砂岩中钾长石含量高于斜长石, 但不足以造成如 K_2O 与 Na_2O 含量如此大的差异, 因此这可能指示了泥质岩岩屑中含富钾矿物或长石受到富钾粘土矿物交代, 如: 伊利石。自流井组样品 K_2O 、 Na_2O 含量接近, 可明显区别于须家河组。

3.2.2 微量元素与稀土元素特征

从样品微量元素分布来看(表 2), 须家河组具有与上地壳相似的高场强元素(如: U、Th)、大离子亲石元素(如: Pb、Rb)组成, 但 Sr 含量明显低于上地壳值。过渡族元素 Zn、Cr、Co 元素含量亏损, 砂岩中 Sc、V 相对于上地壳亏损, 泥岩中却富集。

须家河组碎屑岩稀土含量、特征比值如表 2 所示, 泥岩 ΣREE 为 $107 \times 10^{-6} \sim 415 \times 10^{-6}$, 平均为 259×10^{-6} , 明显高于砂岩 ΣREE 含量: $62 \times 10^{-6} \sim 171 \times 10^{-6}$ (除 10-2h), 平均为 160×10^{-6} , 且 ΣREE 与 SiO_2 存在较好的负相关性。样品 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 7.74 ~ 18.27, 平均为 13.51; Eu/Eu^* 为 0.53 ~ 0.79, 平均为 0.61; Ce/Ce^* 为 0.55 ~ 1.09, 平均为 0.79; La/Yb 比值在 10.27 ~ 32.68 之间, 平均为 23.69; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 6.94 ~ 22.08, 平均为 16.01; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{unc}}$ 值为 0.65 ~ 2.07, 平均值为 1.50。尽管样品 REE 绝对含量变化较大, 但球粒陨石标准化配分型式较一致, 均呈现轻稀土富集、重稀土平坦及中度 Ce、Eu 负异常特征, 这与大陆上地壳稀土元素配分型式极为相似(图 2)。

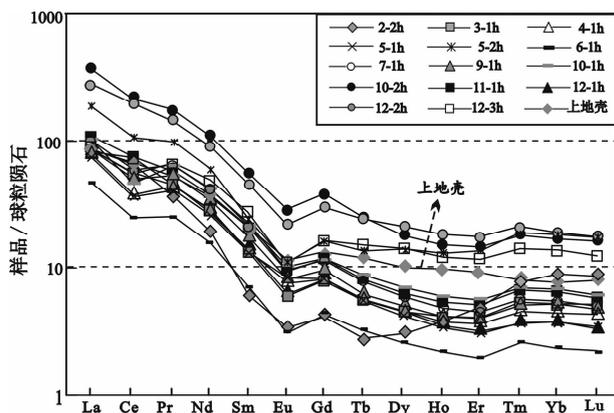


图 2 忠路剖面须家河组碎屑岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns for Xujiahe Formation clastic rocks at Zhonglu section, in Lichuan area (normalized values after Taylor and McLennan, 1985)

4 讨论

4.1 化学成分与风化作用

4.1.1 成分变异指数

Cox *et al.* (1995) 在研究简单大陆板块上泥岩成分随时间系统变化时, 发现与年轻的沉积物相比, 除 K_2O 表现出上升趋势、 SiO_2 与 Al_2O_3 没有明显规律外, 再旋回沉积物氧化物含量均呈现下降趋势, 并提出了成分变异指数:

$$\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (百分含量)}$$

沉积物在循环过程中非粘土性矿物的降低与粘土性矿物的增长, 或者第一次循环碎屑输入量的降低, 都将导致 ICV 值降低。粘土矿物含量较低的岩石 ICV 值一般 > 1 , 这种岩石经常作为第一次旋回的沉积物沉积于构造活动地区; 粘土矿物含量较高的碎屑岩 ICV 值 < 1 , 形成于构造平静环境, 此背景下第一次循环沉积物的再循环十分发育 (Cox *et al.*, 1995)。扬子陆块属于稳定的克拉通, 研究区位于扬子陆块中部, 符合 Cox 提出的简单大陆板块的前提, 本文尝试将 ICV 值应用于砂级碎屑岩研究。须家河组碎屑岩 ICV 值为 0.18 ~ 0.68, 平均值为 0.45, 表明岩石中含有较高的粘土矿物, 物源主要为再旋回沉积物, 这与前文所述的砂岩含泥质岩岩屑、长石普遍高岭石化的特征一致。纵向上, ICV 表现为三段式变化(包括自流井组的 2 个样品, 图 1c), 2-10 层底部, ICV 值有所波动, 但整体显示了逐渐下降的特点; 10 层上部-12 层底部达到最低值; 12 层中部-15 层, ICV 值明显增加, 可能反映了第一次旋回碎屑物输入量的增加。

4.1.2 化学风化指数

4.1.2.1 CIA 的计算方法

Nesbitt and Young (1982) 指出长石是地壳含量最高的不稳定矿物, 因此化学风化作用主要表现在长石的风化与相应粘土矿物的形成。风化过程中, 长石中的 K、Na、Ca 离子溶解, 导致风化产物中 Al 与碱金属比例的增加, 并以此为依据提出了细碎屑岩的化学风化指数:

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100 \text{ (摩尔量)}$$

CaO^* 是硅酸盐矿物中的 CaO 含量, 不包括碳酸盐与磷灰石中的 CaO。化学风化越强烈, CIA 值就越大, 如: 更新世冰碛土的 CIA 为 52, 冰川粘土为 60 ~ 65, 季纹泥约为 60, 页岩平均值为 70 ~ 75, 残余粘土最高。McLennan (1993) 提出 CaO^* 的校正方法, 先利用 P_2O_5 含量除去磷灰石中的 CaO, 本文计算方法采用: $\text{CaO} = 10/3 \times \text{P}_2\text{O}_5$ (摩尔量) (Deer *et al.*, 1966), 再计算 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 的摩尔比值, 如果比值 > 1 , 以 Na_2O 的摩尔含量代替 CaO; 若比值 < 1 , 则直接以 CaO 摩尔含量来计算。虽然镜下观察未见碳酸盐矿物, 但为谨慎起见, 依然按照 McLennan (1993) 的方法计算 CaO^* 值。

4.1.2.2 沉积物再循环、碎屑粒度对 CIA 的影响

CIA 最早广泛应用于元古代气候研究,分析的对象是细碎屑岩和杂砾岩的基质 (Nesbitt and Young, 1982, 1989; Fedo *et al.*, 1997; Feng *et al.*, 2004)。元古代之前的沉积岩不发育,沉积再循环作用对物源成分的影响很小,元古代之后沉积岩已经十分发育,因此沉积再循环作用对于物源成分的影响就不容忽略了(冯连君等, 2003)。沉积物的再循环使粘土矿物比例增加,从而使 CIA 值得到累积。ICV 的特征表明研究区物源主要为再旋回沉积物,因此 CIA 值是沉积物循环过程中化学风化作用累积的结果,并不能直接代表末次沉积的化学风化强度。Shao and Yang (2012) 对长江流域悬浮物粒度与 CIA 值的相关性研究表明 CIA 受悬浮物粒度的影响非常弱。同时,国内一些学者将 CIA 运用到了中砂级沉积物的研究,并取得了良好的效果(张金亮和张鑫, 2007; 张鑫等, 2007; 赵小明等, 2011)。粒度分析表明本次用于 CIA 研究样品除样品 4-1h、6-1h、7-1h、9-1h 中的部分颗粒达到中砂级别外(定名为:中砂质细砂岩),其他样品的颗粒处于细粒及以下级别(定名为:细砂岩、粗粉砂质极细砂岩、泥岩)。忠路剖面的 CIA 值如表 1 所示,研究表明 CIA 值与粒度不具明显相关性,因此 CIA 值受粒度影响较小。

4.1.2.3 CIA 特征

利川忠路剖面砂岩与泥岩的 CIA 值没有明显区别,介于 72.10 ~ 96.28 之间,平均为 81.18(表 1),大于页岩平均值,表明沉积物累积经历的化学风化作用强烈。细砂岩样品 10-2h、11-1h 与 12-1h, CIA 值均大于 91,这与镜下观察到的长石普遍高岭石化现象一致,表明样品 CIA 值主要与粘土矿物含量有关。纵向上, CIA 变化表现出三分性(包括自流井组的 2 个样品,图 1c), 2-10 层下部, CIA 值变化幅度不大,但显示持续下降特点,10 层上部-12 层下部, CIA 位于高值,指示累积化学风化作用达到顶峰,12 层上部-15 层, CIA 值持续降低。

CIA 值与 ICV 值具有良好的负相关性(图 1c), 相关系数 $R^2 = 0.866$ 。2-10 层下部, ICV 的减小表明再循环物质输入比例增加,这会造成粘土矿物(如:高岭石、绿泥石的 CIA 接近 100)比例增加(Cox *et al.*, 1995),从而导致 CIA 值升高,随着再循环碎屑输入量达到最高值, CIA 也达到顶峰(10 层上部-12 层下部)。同样, 12 层上部-15 层,随着第一次循环物质输入量的增加(ICV 升高), CIA 值明显降低。因此, CIA 的变化可能主要是由不同时期输入碎屑物成分不同引起的。

4.2 物源

4.2.1 主量元素与物源

Roser and Korsch (1988) 提出了一套适用于砂、泥岩的主量元素多变量物源区环境的判别函数。如图 3 所示,除 1 个泥岩样品外,包括自流井组样品在内的所有样品均落入富含石英质沉积岩物源区,该物源区可能为古老的地质体、克拉通或是再旋回造山带。值得指出的是,泥岩样品的 F2 值明

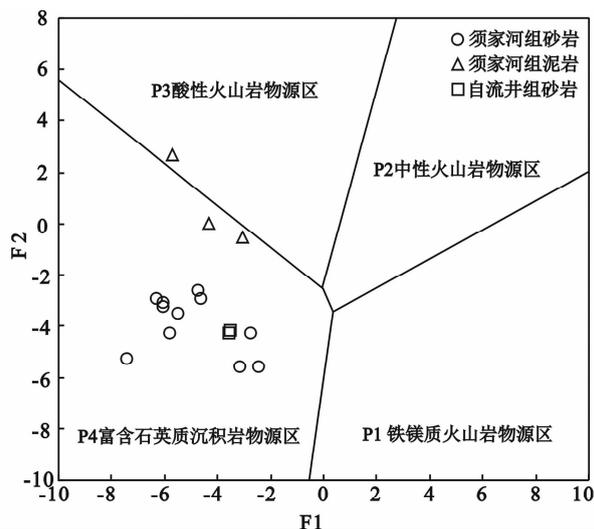


图3 须家河组碎屑岩 F2-F1 物源判别图解(据 Roser and Korsch, 1988)

Fig. 3 Discrimination function diagram (F2-F1) for illustrating sedimentary provenance of Xujiahe Formation clastic rocks (after Roser and Korsch, 1988)

显高于砂岩样品,这可能与泥岩中 Al_2O_3 与 TiO_2 含量较高有关。

4.2.2 微量、稀土元素与物源

部分微量元素(如:Th、Sc、V、Co)对碎屑沉积物源区具有良好的指示意义(Bhatia and Crook, 1986)。镁铁质会导致碎屑沉积物中 Sc、V 和 Co 等元素的升高,而长英质则会引起 La 和 Th 等元素的增加,与上地壳相比须家河组砂岩具有明显偏低的 Sc、V 和 Co,弱亏损的 Th 与富集的 La 含量(表 2), La/Sc、Th/Sc、Th/Co 平均值分别为:5.54、1.09 与 3.88,均明显大于上地壳比值,表明源岩更可能是长英质岩石。

REE 常被认为是非迁移的,在沉积作用过程中仅仅显示微小的变化,源区岩石中的丰度以及风化条件是控制沉积物中 REE 的主要因素,而沉积时和沉积后的作用,如:搬运、沉积和成岩过程中的交换反应,对沉积物中 REE 含量的改变很微弱,因此源区岩石 REE 特征能够被可靠地保存在沉积物中(Bhatia, 1985)。Eu 异常(Eu/Eu^*)可以灵敏地反映体系内的地球化学状态,并可作为鉴别物质来源的重要参数,如:花岗岩和长英质变质岩以及来自大陆源区的沉积岩等 Eu 多显示为负异常。须家河组砂岩的 Eu/Eu^* 比值在 0.53 ~ 0.79 之间,平均 0.61(表 2),显示负异常,记录了源岩的 Eu 亏损。同样,稀土元素的配分型式可以客观的反映沉积物物源性质。前文指出须家河组碎屑岩稀土元素具有与上地壳相似的配分型式,表明沉积物主要来源于上地壳。其原因在于上地壳中大离子亲石元素的含量相对于原始地幔明显偏高,导致轻稀土富集重稀土亏损,而上地壳内缺少使重稀土分馏的因素,因而重稀土含量均匀, Eu 的负异常是由于元素分异作用使上地壳中 Eu 元素缺失造成的(McLennan *et*

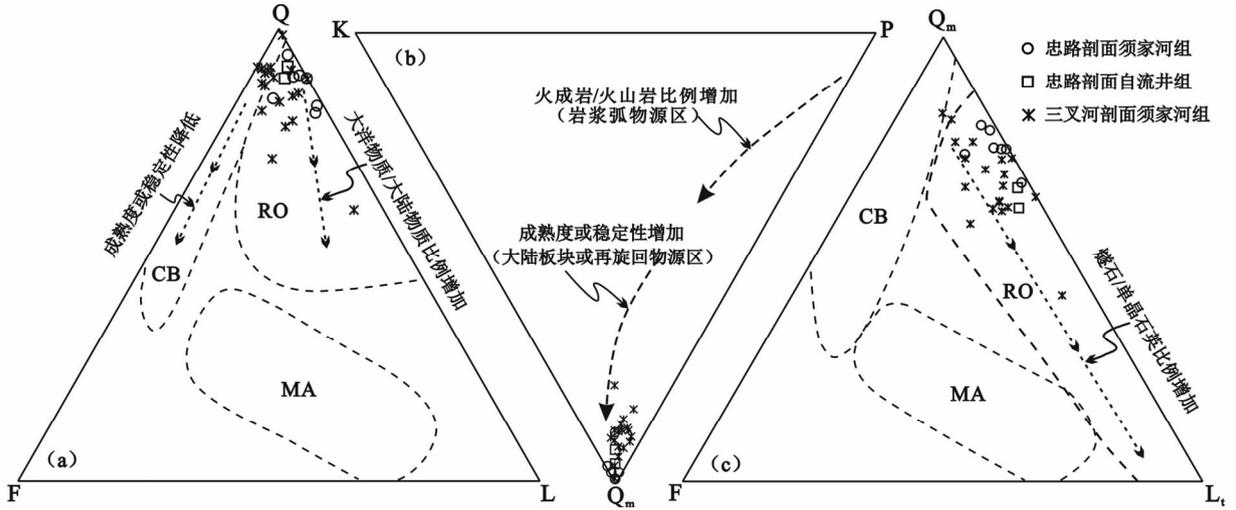


图4 利川地区须家河组砂岩 Q-F-L (a)、 Q_m -P-K (b) 和 Q_m -F- L_i (c) 大地构造背景判别图解 (据 Dickinson and Suczek, 1979)

CB-大陆板块物源区;RO-再旋回造山物源区;MA-岩浆弧物源区

Fig. 4 Q-F-L (a), Q_m -P-K (b) and Q_m -F- L_i (c) tectonic settings discriminating diagrams for Xujiahe Formation in Lichuan area (after Dickinson and Suczek, 1979)

al., 1995)。

4.3 构造背景

4.3.1 砂岩碎屑组成与构造背景

Dickinson and Suczek (1979) 提出了砂岩碎屑颗粒组成与物源区构造环境 Q-F-L、 Q_m -F- L_i 及 Q_m -P-K 判别图解, 并指出大陆板块来源与再旋回造山带来源在 Q-F-L 图解的 Q 极点有部分重合, 两者不易区分, 而 Q_m -F- L_i 能较好的区分这两者。在 Q-F-L 图解中 (图 4a), 忠路剖面须家河组与自流井组样品均落入再旋回造山带, 且较紧密的分布于 Q 极点附近, 三叉河地区样品较分散, 部分指示了大陆板块来源; Q_m -F- L_i 图解中 (图 4c), 除了 1 个样品外, 均指示了再旋回造山来源; Q_m -P-K 图解 (图 4b) 高度一致的表明物源来自成熟度较高的大陆板块或再旋回物源区。上述图解综合表明须家河组砂岩物源主要来自再旋回造山带。再旋回造山带物源区可分为 3 种: 第一是板块俯冲带的混杂岩物源区, 由已有构造变形的蛇绿岩和洋中其他物质所组成; 第二是碰撞造山带物源区, 即两个板块相接合的地区, 大部分由沉积、沉积变质的推覆体和冲断岩席所组成; 第三, 前陆隆起物源区, 为前陆褶皱-冲断带 (岩石类型为沉积岩序列) 所形成的高地, 被侵蚀后产生的碎屑可直接流入相邻的前陆盆地内, 此外, 盆地还接受克拉通内隆起提供的碎屑物质, 因而砂岩的成熟度也相对高一些 (Dickinson and Suczek, 1979)。须家河组砂岩石英颗粒含量高, 石英对长石的比值高, 普遍含有 (低级变质) 沉积岩岩屑, 不含火成岩岩屑, 这些特征均指示物源区主要为前陆隆起区。

4.3.2 主量元素与构造背景

Bhatia (1983) 指出从大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘到被动大陆边缘, 杂砂岩 ($Fe_2O_3^T + MgO$)^{*}、 TiO_2 ^{*}、 Al_2O_3/SiO_2 降低, 而 K_2O/Na_2O 与 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 值增加 (表 3), 并建立了主量元素多变量构造环境判别方程。同时, 一些学者将其推广到砂岩的构造背景研究中, 并取得了良好的成效 (张金亮和张鑫, 2007; Kong *et al.*, 2011)。利川忠路剖面砂岩 ($Fe_2O_3^T + MgO$)^{*}: 0.98% ~ 3.20%, 平均 1.50%; TiO_2 ^{*}: 0.09% ~ 1.09%, 平均 0.39%; Al_2O_3/SiO_2 : 0.04 ~ 0.18, 平均 0.12; K_2O/Na_2O : 4.90 ~ 82.41, 平均 40.01, 最接近被动大陆边缘的特征值 (表 3), 由于砂岩极度贫 Na_2O , 因此具有较高 K_2O/Na_2O 比值。自流井组 2 个砂岩样品却更接近活动大陆边缘特征。此次研究将泥岩也纳入构造环境判别方程, 如图 5a, 6 个砂岩与 1 个泥岩样品落入被动大陆边缘, 4 个砂岩与 2 个泥岩样品落入活动大陆边缘区域, 指示了构造背景为被动与活动大陆边缘。

Roser and Korsch (1986) 利用砂、泥岩 K_2O/Na_2O 与 SiO_2 的变化规律, 提出了 K_2O/Na_2O-SiO_2 构造环境判别图解 (图 5b), 所有样品显示出了高度的一致性, 均指示了被动大陆边缘构造环境。考虑到沉积物再循环过程使 K_2O 增加 (Cox *et al.*, 1995), 而导致 K_2O/Na_2O 比值升高, 因此构造背景也可能包括活动大陆边缘。

4.3.3 微量、稀土元素与构造背景

由于稀土元素和一些微量元素, 如: Th、Sc、Co, 在天然水体中很难溶解, 不易受风化搬运和沉积作用影响, 能够很好的反映源区的地球化学性质, 因此被广泛的应用到沉积物物源和构造背景的研究中 (Bhatia and Crook, 1986; McLennan

表3 须家河组砂岩与不同构造环境杂砂岩主量元素(wt%, 据 Bhatia, 1983)、微量元素($\times 10^{-6}$, 据 Bhatia and Crook, 1986)特征参数的对比

Table 3 Comparison major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements characteristics of Xujiahe Formation sandstones with graywackes in different tectonic settings (after Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986)

构造环境	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘	须家河组砂岩平均值
(Fe ₂ O ₃ ^T + MgO) *	8 ~ 14	5 ~ 8	2 ~ 5		1.50
TiO ₂ *	0.8 ~ 1.4	0.5 ~ 0.7	0.25 ~ 0.45	富 SiO ₂ 、贫 Na ₂ O、	0.39
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.24 ~ 0.33	0.15 ~ 0.22		CaO、TiO ₂	0.12
K ₂ O/Na ₂ O	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.8	≈ 1		40.01
Pb	6.9 ± 1.4	15.1 ± 1.1	24 ± 1.1	16 ± 3.4	16.13
Th	2.27 ± 0.7	11.1 ± 1.1	18.8 ± 3.0	16.7 ± 3.5	7.79
Sc	19.5 ± 5.2	14.8 ± 1.7	8 ± 1.1	6 ± 1.4	6.61
V	131 ± 40	89 ± 13.7	48 ± 5.9	31 ± 9.9	34.52
Co	18 ± 6.3	12 ± 2.7	10 ± 1.7	5 ± 2.4	2.68
Zn	89 ± 18.6	74 ± 9.8	52 ± 8.6	26 ± 12	16.05
La	8.72 ± 2.5	24.4 ± 2.3	33 ± 4.5	33.5 ± 5.8	41.12
Ce	22.53 ± 5.9	50.5 ± 4.3	72.7 ± 9.8	71.9 ± 11.5	65.01
Nd	11.36 ± 2.9	20.8 ± 1.6	25.4 ± 3.4	29 ± 5.03	28.73
Rb/Sr	0.05 ± 0.05	0.65 ± 0.33	0.89 ± 0.24	1.19 ± 0.40	2.76
Th/U	2.1 ± 0.78	4.6 ± 0.45	4.8 ± 0.38	5.6 ± 0.7	5.90
La/Th	4.26 ± 1.2	2.36 ± 0.3	1.77 ± 0.1	2.20 ± 0.47	5.16
La/Sc	0.55 ± 0.22	1.82 ± 0.3	4.55 ± 0.8	6.25 ± 1.35	6.34
Th/Sc	0.15 ± 0.08	0.85 ± 0.13	2.59 ± 0.5	3.06 ± 0.8	1.23
Sc/Cr	0.57 ± 0.16	0.32 ± 0.06	0.30 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.30

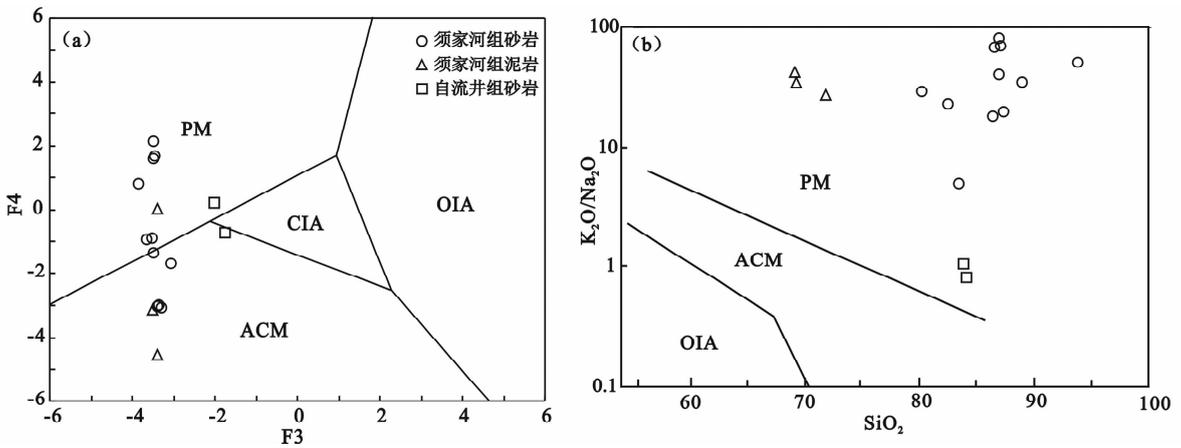


图5 须家河组碎屑岩 F4-F3 (a, 据 Bhatia, 1983) 和 K₂O/Na₂O-SiO₂ (b, 据 Roser and Korsch, 1986) 构造环境判别图解
PM: 被动大陆边缘; ACM: 活动大陆边缘; OIA: 大洋岛弧; CIA: 大陆岛弧

Fig. 5 Tectonic discrimination diagram of the Xujiahe Formation clastic rocks base on F4-F3 (a, after Bhatia, 1983) and K₂O/Na₂O vs. SiO₂ (b, after Roser and Korsch, 1986)

et al., 1995)。将须家河组与自流井组 16 个样品投影到 Bhatia and Crook (1986) 建立的 La-Th-Sc 三角图中 (图 6), 除 3 个样品位于大陆岛弧区 (附近) 外, 其他均紧邻活动及被动大陆边缘区分布。砂岩微量元素 Pb、Th、Sc、V、Co、Zn、La、Ce、Nd 平均含量分别为 16.13×10^{-6} 、 7.79×10^{-6} 、 6.61×10^{-6} 、 34.52×10^{-6} 、 2.68×10^{-6} 、 16.05×10^{-6} 、 41.12×10^{-6} 、 65.01×10^{-6} 、 28.73×10^{-6} 、Rb/Sr、Th/U、La/Th、La/Sc、Th/Sc、Sc/Cr 平均比值分别为 2.76、5.90、5.16、6.34、1.23、

0.30, 总体最接近被动大陆边缘特征值 (表 3)。因此, 认为须家河组沉积时期的构造背景主要为被动大陆边缘。

Bhatia (1985) 对已知构造背景的杂砂岩、泥岩的地球化学特征参数进行总结, 确定了不同构造环境下稀土元素及特征参数值 (表 4)。忠路剖面须家河组砂岩的稀土元素平均值与之对比表明, La、La/Yb、(La/Yb)_N 最接近被动大陆边缘, Eu/Eu*、 $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 与安第斯型大陆边缘最接近, 而 Ce 与 $\sum \text{REE}$ 具有大陆岛弧特征, 考虑到被动大陆边缘形

表4 须家河组砂岩与不同构造环境杂砂岩稀土元素特征参数的对比(据 Bhatia, 1985)

Table 4 Comparison REE characteristics of Xujiahe Formation sandstones with graywackes in different tectonic settings (after Bhatia, 1985)

构造环境 物源类型	大洋岛弧 未切割的岩浆弧	大陆岛弧 切割岩浆弧	安第斯型大陆边缘 隆升的基底	被动大陆边缘 克拉通内部构造高地	须家河组砂岩平均值
La	8 ± 1.7	27 ± 4.5	37	39	41.12
Ce	19 ± 3.7	59 ± 8.2	78	85	65.01
Eu/Eu*	1.04 ± 0.11	0.79 ± 0.13	0.6	0.56	0.61
ΣREE	58 ± 10	146 ± 20	186	210	160
L/H	3.8 ± 0.9	7.7 ± 1.7	9.1	8.5	13.79
La/Yb	4.2 ± 1.3	11.0 ± 3.6	12.5	15.9	25.57
(La/Yb) _N	2.8 ± 0.9	7.5 ± 2.5	8.5	10.8	17.28

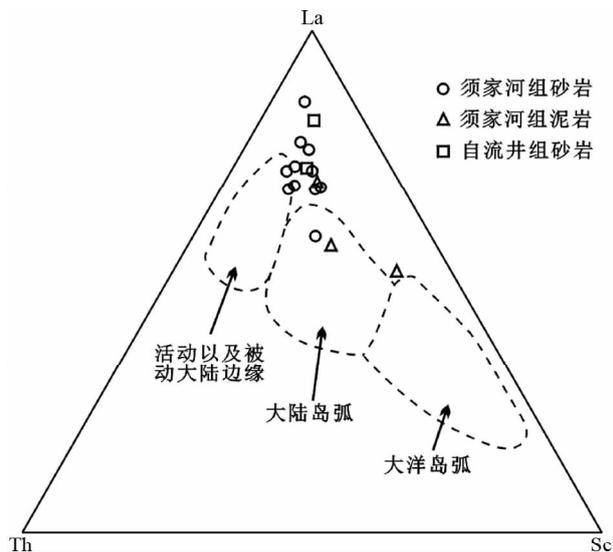


图6 须家河组碎屑岩微量元素 La-Th-Sc 构造环境判别图解(据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 6 Tectonic discrimination diagrams of the Xujiahe Formation clastic rocks base on La-Th-Sc (after Bhatia and Crook, 1986)

成的砂岩可以包含较多大陆岛弧的地球化学信息(柏道远等, 2007),因此,该特征反映了晚三叠世须家河组沉积时期的构造背景为活动与被动大陆边缘,对应的物源来自隆升的基底与克拉通内部的构造高地。这与前文判别函数 F4-F3 的判断结果一致。

晚三叠世时期,扬子陆块东南侧发生陆内挤压造山形成雪峰山陆内复合构造系统(Wang *et al.*, 2005; 郑荣才等, 2009; Zhang *et al.*, 2013),同时,扬子陆块北侧与华北陆块及其间的秦岭微陆块发生持续俯冲碰撞造山(刘少峰和张国伟, 2008; Zhang *et al.*, 2013),因此,研究区须家河组沉积时期的构造背景具有陆内环境与碰撞造山双重属性。碎屑岩颗粒组成与地球化学特征表明须家河组形成于被动大陆边缘(为主)与活动大陆边缘环境。Roser and Korsch (1986)所定义的被动大陆边缘包括克拉通内部环境,活动大陆边缘包

括大陆碰撞及与俯冲相关的环境,因此本文基于碎屑岩颗粒组成与地球化学的研究得出的须家河组沉积构造背景与前人的研究成果一致。指示形成环境为被动大陆边缘的岩石,其物源应来自雪峰陆内造山带(图 1a,施振生等, 2010),结合前文的讨论结果,其应为主要物源区;而形成环境具有活动大陆边缘特征的岩石,其物源区应为秦岭-大别碰撞造山带(淡永等, 2013)。综上所述,鄂西南利川地区须家河组形成于被动大陆边缘(为主)与活动大陆边缘环境,其物源来自东南的雪峰隆起区(为主)与北侧的秦岭造山带。

5 结论

(1)鄂西南利川地区三叠纪须家河组砂岩碎屑颗粒富石英,贫岩屑与长石,平均值分别为: 76.23%、7.08% 与 4.88%, $Q/(Q+F+L)$ 平均值为 0.86, 钾长石普遍高岭石化,斜长石普遍绢云母化,岩屑均为泥质岩,具有锆石-板钛矿-磁铁矿-电气石重矿物组合,指示物源区岩石以酸性岩或低级变质岩为主。

(2)须家河组碎屑岩成分变异指数 ICV 为 0.18 ~ 0.68, 平均为 0.45, 指示源岩主要为再循环沉积物,而沉积物再循环会导致粘土矿物比例增加,从而使化学风化指标 CIA 值得到累积。较高的 CIA 值说明沉积物累积受到的化学风化作用强烈,而 CIA 与 ICV 强烈负相关,表明 CIA 的变化主要是由不同时期输入的碎屑物成分不同引起的。

(3)碎屑组成、地球化学特征与判别图解综合表明须家河组形成于被动大陆边缘(为主)与活动大陆边缘环境,其物源来自东南的雪峰隆起区(为主)与北侧的秦岭造山带。

致谢 所有参加“湖北 1:5 万汪家营幅、利川市幅、忠路幅、黄泥塘幅区域地质调查”项目组的同志付出了辛勤的劳动;武汉地质矿产研究所牛志军、龙文国研究员给予了悉心指导;两位匿名审稿专家为本文提出了宝贵意见;在此一并表示感谢!

References

- Armstrong-Altrin JS, Lee YIL, Verma SP and Ramasamy S. 2004. Geochemistry of sandstones from the upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 74(2): 285–297
- Bai DY, Zhou L, Wang XH, Zhang XY and Ma TQ. 2007. Geochemistry of Nanhuan-Cambrian sandstones in southeastern Hunan, and its constraints on Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic setting of South China. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 755–771 (in Chinese with English abstract)
- Bhatia MR. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611–627
- Bhatia MR. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45(1–2): 97–113
- Bhatia MR and Crook KAW. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193
- Cox R, Lowe DR and Cullers RL. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940
- Cullers RL. 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51(3): 181–203
- Dan Y, Lin LB, Zhong YJ and Fan Y. 2013. The conglomerate composition of the Fourth Member of Xujiahe Formation, Upper Triassic, in the front of Micang-Daba Mountains, Sichuan, China: Implication for provenance analysis. *Geological Review*, 59(1): 15–23 (in Chinese with English abstract)
- Deer WA, Howie RA and Zussman J. 1966. *An Introduction to the Rock-forming Minerals*. Longman: Prentice Hall
- Dickinson WR and Suzeck CA. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63(12): 2164–2182
- Dickinson WR. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa GG (ed.). *Provenance of Arenites*. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 333–361
- Dostal J and Keppie JD. 2009. Geochemistry of low-grade clastic rocks in the Acatlán Complex of southern Mexico: Evidence for local provenance in felsic-intermediate igneous rocks. *Sedimentary Geology*, 222(3–4): 241–253
- Fedo CM, Young GM and Nesbitt HW. 1997. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to icehouse transition. *Precambrian Research*, 86(3–4): 201–223
- Feng LJ, Chu XL, Zhang QR and Zhang TG. 2003. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539–544 (in Chinese with English abstract)
- Feng LJ, Chu XL, Zhang QR, Zhang TG, Li H and Jiang N. 2004. New evidence of deposition under cold climate for the Xieshuihe Formation of the Nanhua System in northwestern Hunan, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(13): 1420–1427
- Kong WL, Wang S, Du YL, Wan Q and Li SY. 2011. Composition and geochemistry of Permian clastic rocks in the northern margin of the Middle and Upper Yangtze region. *Geochimica*, 40(5): 473–4863
- Li SY, Li RW, Yue SC, Liu Y, Wang DX, Meng QR and Jin FQ. 2004. Geochemistry of rare earth elements of Mesozoic-Cenozoic sandstones in north margin of Dabie Mountains and adjacent areas: Constraints to source rocks. *Journal of Rare Earths*, 22(4): 558–562
- Li SY, Li RW, Meng QR, Wang DX and Liu Y. 2005. Geochemistry of the Mesozoic and Cenozoic detrital rocks and its constraints on provenance in the southeast foot of Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1157–1166 (in Chinese with English abstract)
- Lin LB, Chen HD, Zhai CB, Hu XQ and Li JW. 2006. Sandstone compositions and paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan basin, China. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(6): 511–517 (in Chinese with English abstract)
- Liu SF and Zhang GW. 2008. Evolution and geodynamics of basin mountain systems in East Qinling-Dabieshan and its adjacent regions, China. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 1943–1960 (in Chinese with English abstract)
- McLennan SM and Taylor SR. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *The Journal of Geology*, 99(1): 1–21
- McLennan SM. 1993. Weathering and global denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295–303
- McLennan SM, Hemming SR, Taylor SR and Eriksson KA. 1995. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(6): 1153–1177
- Mei MX. 2010. Stratigraphic impact of the Indo-China Movement and its related evolution of sedimentary-basin pattern of the Late Triassic in the Middle-Upper Yangtze region, South China. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 99–111 (in Chinese with English abstract)
- Nesbitt HW and Young GM. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715–717
- Nesbitt HW and Young GM. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*, 97(2): 129–147
- Rashid SA. 2005. The geochemistry of Mesoproterozoic clastic sedimentary rocks from the Rautgara Formation, Kumaun Lesser Himalaya: Implications for provenance, mineralogical control and weathering. *Current Science*, 88(11): 1832–1836
- Roser BP and Korsch RJ. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650
- Roser BP and Korsch RJ. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67(1–2): 119–139
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick RL (eds.). *The Crust*. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier-Perгамon, 1–64
- Shao JQ and Yang SY. 2012. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? *Chinese Science Bulletin*, 57(10): 1178–1187
- Shi ZS, Yang W, Xie ZY, Jin H and Xie WR. 2010. Upper Triassic clastic composition in Sichuan basin, Southwest China: Implication for provenance analysis and the Indosinian Orogeny. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 387–397 (in Chinese with English abstract)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications
- Wang YJ, Zhang YH, Fan WM and Peng TP. 2005. Structural signatures and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China block. *Journal of Structural Geology*, 27(6): 985–998
- Wang YJ, Fan WM, Zhang GW and Zhang YH. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China block: Key observations and controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273–1305
- Yan DP, Zhou MF, Song HL, Wang XW and Malpas J. 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361(3–4): 239–254
- Yan QR, Gao SL, Wang ZQ, Li JL, Xiao WJ, Hou QL, Yan Z and Chen HH. 2002. Geochemical constraints of sediments on the provenance,

- depositional environment and tectonic setting of the Songliao Prototype basin. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 455–462
- Yang DD, Li SY, Zhao DQ, Wang S, Du YL and Zhao WW. 2012. Geochemistry and detrital zircon geochronology of Carboniferous detrital rocks in the northern margin of Dabie Mountains, central China and constraints to distinguishing the provenance tectonic attribute. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2619–2628 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Du YS, Cawood PA and Xu YJ. 2012. Modal and geochemical compositions of the Lower Silurian clastic rocks in North Qilian, NW China: Implications for provenance, chemical weathering, and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 82(2): 92–103
- Zhang GW, Guo AL, Wang YJ, Li SZ, Dong YP, Liu SF, He DF, Cheng SY, Lu RK and Yao AP. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. *Science China (Earth Sciences)*, 56(11): 1804–1828
- Zhang JL and Zhang X. 2007. Element geochemistry of sandstones in the Silurian of central Tarim basin and the significance in provenance discrimination. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2990–3002 (in Chinese with English abstract)
- Zhang X, Zhang JL and Qin LJ. 2007. Petrological characteristics and provenance analysis of sandstones in the Kepingtage Formation of Silurian in the Tarim basin. *Journal of Mineralogy Petrology*, 27(3): 106–115 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YL, Wang ZQ, Yan Z and Wang T. 2011. Tectonic setting of Neoproterozoic Beiyixi Formation in Quruqtagh area, Xinjiang: Evidence from geochemistry of clastic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1785–1796 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XM, Liu SD, Zhang QX, Wu JH, Zeng BF, Liao ZM, Yang GZ and Li FH. 2011. Geochemical characters of the Nanhua System in Changyang, western Hubei Province and its implication for climate and sequence correlation. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 576–585 (in Chinese with English abstract)
- Zheng RC, Dai CC, Zhu RK, Zhai WL, Gao HC and Geng W. 2009. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan basin. *Geological Review*, 55(4): 484–495 (in Chinese with English abstract)
- 家河组四段砾岩特征及其对物源的指示. *地质论评*, 59(1): 15–23
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. *地质前缘*, 10(4): 539–544
- 李双应, 李任伟, 孟庆任, 王道轩, 刘因. 2005. 大别山东南麓中新世碎屑岩地球化学特征及其对物源的制约. *岩石学报*, 21(4): 1157–1166
- 林良彪, 陈洪德, 翟常博, 胡晓强, 李君文. 2006. 四川盆地西部须家河组砂岩组分及其古地理探讨. *石油实验地质*, 28(6): 511–517
- 刘少峰, 张国伟. 2008. 东秦岭-大别山及邻区盆-山系统演化与动力学. *地质通报*, 27(12): 1943–1960
- 梅冥相. 2010. 中上扬子印支运动的地层学效应及晚三叠世沉积盆地格局. *地质前缘*, 17(4): 99–111
- 施振生, 杨威, 谢增业, 金惠, 谢武仁. 2010. 四川盆地晚三叠世碎屑组分对源区分析及印支运动的指示. *地质学报*, 84(3): 387–397
- 杨栋栋, 李双应, 赵大千, 王松, 杜叶龙, 赵万维. 2012. 大别山北缘石炭系碎屑岩地球化学及碎屑锆石年代学分析及其对物源区大地构造属性判别的制约. *岩石学报*, 28(8): 2619–2628
- 张金亮, 张鑫. 2007. 塔中地区志留系砂岩元素地球化学特征与物源判别意义. *岩石学报*, 23(11): 2990–3002
- 张鑫, 张金亮, 覃利娟. 2007. 塔里木盆地志留系柯坪塔格组砂岩岩石特征与物源分析. *矿物岩石*, 27(3): 106–115
- 张英利, 王宗起, 闫臻, 王涛. 2011. 库鲁克塔格地区新元古代贝义西组的构造环境: 来自碎屑岩地球化学的证据. *岩石学报*, 27(6): 1785–1796
- 赵小明, 刘圣德, 张权绪, 吴健辉, 曾波夫, 廖宗明, 杨刚忠, 李方会. 2011. 鄂西长阳南华系地球化学特征的气候指示意义及地层对比. *地质学报*, 85(4): 576–585
- 郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 翟文亮, 高红灿, 耿威. 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序——岩相古地理特征. *地质论评*, 55(4): 484–495

附中文参考文献

- 柏道远, 周亮, 王先辉, 张晓阳, 马铁球. 2007. 湘东南南华系-寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代-早古生代构造背景的制约. *地质学报*, 81(6): 755–771
- 淡水, 林良彪, 钟怡江, 范昱. 2013. 米仓山-大巴山前缘上三叠统须