

滇西户撒盆地芒棒组砂岩地球化学特征及物源区和构造背景分析

张建军^{1, 2)}, 牟传龙³⁾, 周恩恩³⁾, 冯丽霞⁴⁾, 伍皓³⁾, 陈小炜³⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 中国地质大学(北京), 北京, 100083;
3) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081; 4) 北京大学, 北京, 100871

内容提要:滇西户撒盆地芒棒组砂岩地球化学分析结果表明:砂岩主要为长石砂岩和杂砂岩, 少量为页岩;矿物成分主要为石英、钾长石、斜长石和伊利石等;REE 配分模式曲线一致, $LREE/HREE = 9.75 \sim 15.91$, 平均 13.24, $(La/Yb)_N = 13.06 \sim 26.41$, 平均 19.21, 轻稀土元素相对重稀土元素明显富集, 稀土元素分馏明显。 $SiO_2/Al_2O_3 = 2.06 \sim 6.01$, 平均 4.60, $ICV = 0.54 \sim 1.09$, 平均 0.86, 结合沉积特征表明样品为被动构造环境下沉积物的再循环而成, 而非强烈风化作用过程中形成的第一次旋回沉积物。 $Th/U = 5.44 \sim 12.10$, 平均 8.48, CIA 纠正均值为 69, 反映了温暖、湿润条件下的中等化学风化作用。A-CN-K 判别图说明交代作用降低了 CIA 值、且样品源岩钾长石比斜长石含量高。 $Th/Sc = 4.43 \sim 25.35$, 平均 8.18, Rb-K₂O 图解、Co/Th-La/Sc 图解和 La/Yb-ΣREE 图解表明样品物源为花岗岩。 $TiO_2-(Fe_2O_3^T + MgO)/Al_2O_3/(CaO + Na_2O)-(Fe_2O_3^T + MgO)$ 、La-Th-Sc 以及 $(K_2O/Na_2O)-SiO_2$ 构造判别图解表明:源岩形成于被动大陆边缘环境, 与中特提斯洋在晚侏罗世—早白垩世已经打开且长期稳定相对应。户撒盆地为沿早期户撒走滑—挤压断裂拉张沉积形成, 接受周缘晚侏罗世—早白垩世花岗岩沉积。

关键词:滇西地区; 户撒盆地; 地球化学; 物源属性; 构造背景

滇西地区是铀资源成矿有利区带, 已探明铀矿床、矿体主要赋存于新近纪芒棒组(Dai Jiemin, 1994; Zhu Xiyang et al., 2004; Li Guoxin et al., 2005; Sun Zexuan et al., 2006)。滇西地区芒棒组已有研究成果主要集中在沉积相、层序地层学以及铀资源成矿条件等方面(Sun Zexuan et al., 1999; Cai Yuqi et al., 2002; Zhao Baoguang et al., 2003; Sun Zexuan et al., 2006), 缺乏针对芒棒组物源属性以及大地构造背景研究。

碎屑沉积岩研究表明:不同类型沉积盆地碎屑组成及其地球化学特征均不同, 且对应于不同的构造背景物源区(Dickinson, 1985; Marsaglia et al., 1992; Ren Junping et al., 2016)。沉积岩的化学组成受源岩成分、物理化学风化条件、搬运、沉积和成岩作用共同制约(Johnsson, 1993), 其地球化学特征可以用来分析沉积岩物源区类型、揭示物源区古风化条件和构造背景(McLennan et al., 1990; Bauluz

et al., 2000; Yan Zhen et al., 2007), 进而讨论大陆地壳演化历史(McLennan et al., 1991; Andersen, 2005; Zhao Yingli et al., 2012)以及盆—山耦合关系(Zerfass et al., 2004; Yan Zhen et al., 2007; Pei Xianzhi et al., 2015)。本文通过对滇西户撒盆地新近纪芒棒组第二段砂岩进行地球化学特征研究, 恢复芒棒组碎屑沉积岩物源区岩石类型和构造背景, 初步建立了碎屑沉积岩和源岩的对应关系。

1 区域地质特征

户撒盆地位于滇西地区(图 1), 为东特提斯构造带南延部分, 区域上处于印度和欧亚两个超级大陆汇聚间的腾冲地体上。腾冲地体原为冈瓦纳大陆一部分(Pan Guitang et al., 1997; Yang Qijun et al., 2006; Zhu Dichen et al., 2010), 于晚古生代自刚瓦纳大陆分裂、北移, 并于晚三叠世—晚白垩世与保山地体发生碰撞、缝合, 形成腾冲地体东缘

注:本文为中国地质调查局项目“西南地区铀矿调查选区及含煤岩系放射性地质环境调查”(编号 DD20160133)资助成果。

收稿日期:2016-08-18; 改回日期:2016-12-23; 责任编辑:周健。

作者简介:张建军,男,1987 年生。博士研究生,主要从事沉积地质与成矿研究。通讯地址:610081,成都市一环路北三段 2 号;Email: jianjunzhang87@163.com。通讯作者:牟传龙,男,1965 年生。研究员、博士生导师,主要从事沉积地质与油气地质研究。Email: cdmchuanlong@163.com。

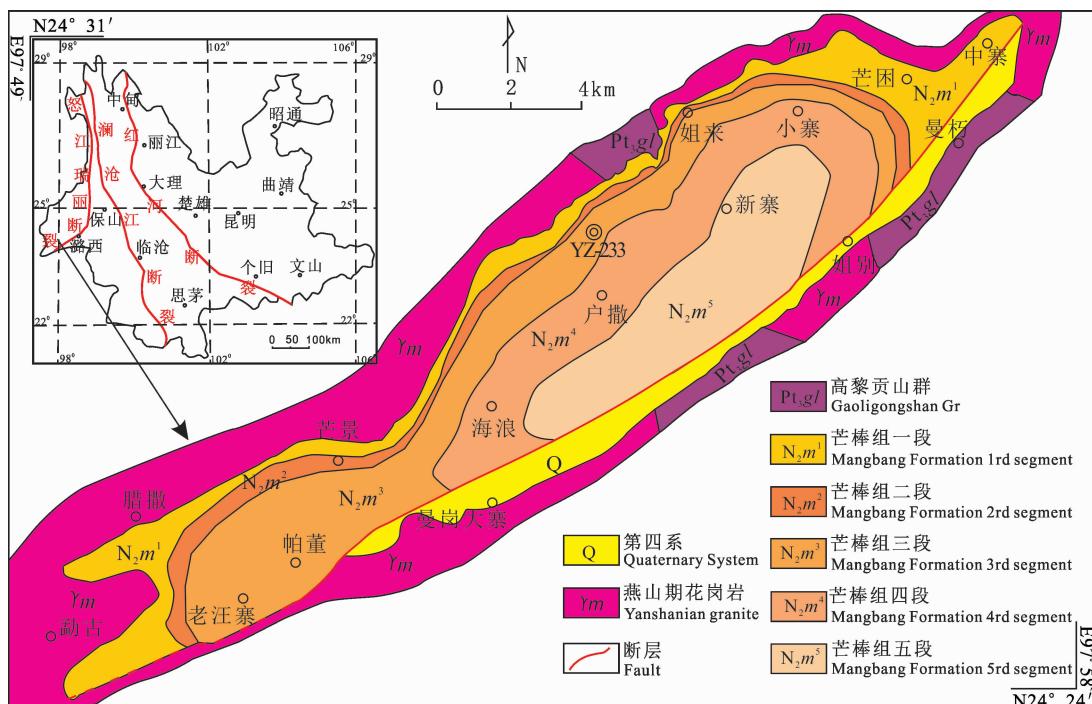


图 1 滇西大地构造简图(a)和户撒盆地区域地质图(b)(据 Wu Hao, 2016)

Fig. 1 Regional tectonic map of western Yunnan(a)and regional geological map of Husa basin(b)(after Wu Hao,2016)

界线。晚白垩世—始新世,缅甸地体沿葡萄-密支那缝合线向腾冲地体俯冲挤压,形成腾冲地体西缘界线。始新世—渐新世,印度和欧亚超级大陆持续汇聚,腾冲地体由碰撞、俯冲逐渐过渡为剪切挤压状态(Kan Rongju et al., 1996)。新近纪,腾冲地体处于碰撞后伸展环境,地壳拉薄,深部地幔物质上涌,形成弧状张裂带。户撒盆地位于弧状张裂带上,盆地明显受户撒断裂控制,呈北东—南西向狭长带状。

户撒盆地基底为混合花岗岩、变质岩。混合花岗岩以灰色花岗岩、花岗斑岩以及黑云母二长花岗岩为主(Zou Guangfu et al., 2013),花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 139 ± 2.3 Ma、 129 ± 5.2 Ma、 118 ± 4.2 Ma(Li Zaihui et al., 2012)。盆地周缘出露少量高黎贡山群变质岩,分布于盆地中段两侧和北部北东区,岩性为灰色、浅灰色片岩、片麻岩。高黎贡山群时代归属存在较大争议,有中元古代、中新元古代、不早于白垩世以及新元古代等不同认识(云南省地矿局,1990; Zhong Dakui, 1998; Li Zaihui et al., 2012)。户撒盆地新近纪芒棒组不整合于基底之上,为一套含煤碎屑岩建造,岩石组合特征与腾冲盆地城子山芒棒组典型剖面差异较大,最大区别是不含火山岩层;根据岩性、岩石组合特征划分为五段(图 2)。通过对户撒盆地 36 口钻井资料筛查发现:其中

23 口钻井最大自然伽马大于 50,13 口钻井最大自然伽马大于 100,且具有放射性异常层数多、单层厚等特征。放射性异常主要分布于新近纪芒棒组一至三段,少量在四至五段,岩性多为粗碎屑砂砾岩。

2 分析测试和地球化学特征

2.1 分析测试

针对户撒盆地新近纪芒棒组放射性异常特征,从钻孔 YZ-233(图 1)采取芒棒组第二段褐色、灰色细砂岩样品进行测试。样品无污染粉碎至 200 目,主量元素采用 X 荧光光谱法(XRF)分析,精度优于 $1\% \sim 3\%$;微量元素采用等离子质谱(ICP-MS)分析,相对标准偏差小于 5%,主量元素、微量元素测试均在核工业北京地质研究院完成。

2.2 主量元素

芒棒组第二段细砂岩 SiO_2 含量为 $52.51\% \sim 82.35\%$,平均 68.97% ; SiO_2 主要来自于石英碎屑或富含 SiO_2 矿物, SiO_2 含量高说明矿物成分成熟度高。 Al_2O_3 含量为 $12.27\% \sim 25.41\%$,平均 15.46% , Al_2O_3 主要来自于黏土矿物和长石。 Fe_2O_3 含量为 $1.29\% \sim 4.2\%$,平均 3.42% , MgO 含量为 $0.26\% \sim 0.89\%$,平均 0.58% ; Fe_2O_3 和 MgO 是沉积岩中镁铁矿物的度量(Chen Gang, 1999)。 CaO 含量为 $0.15\% \sim 2.5\%$,平均 1.16% , CaO 和 MgO 可以

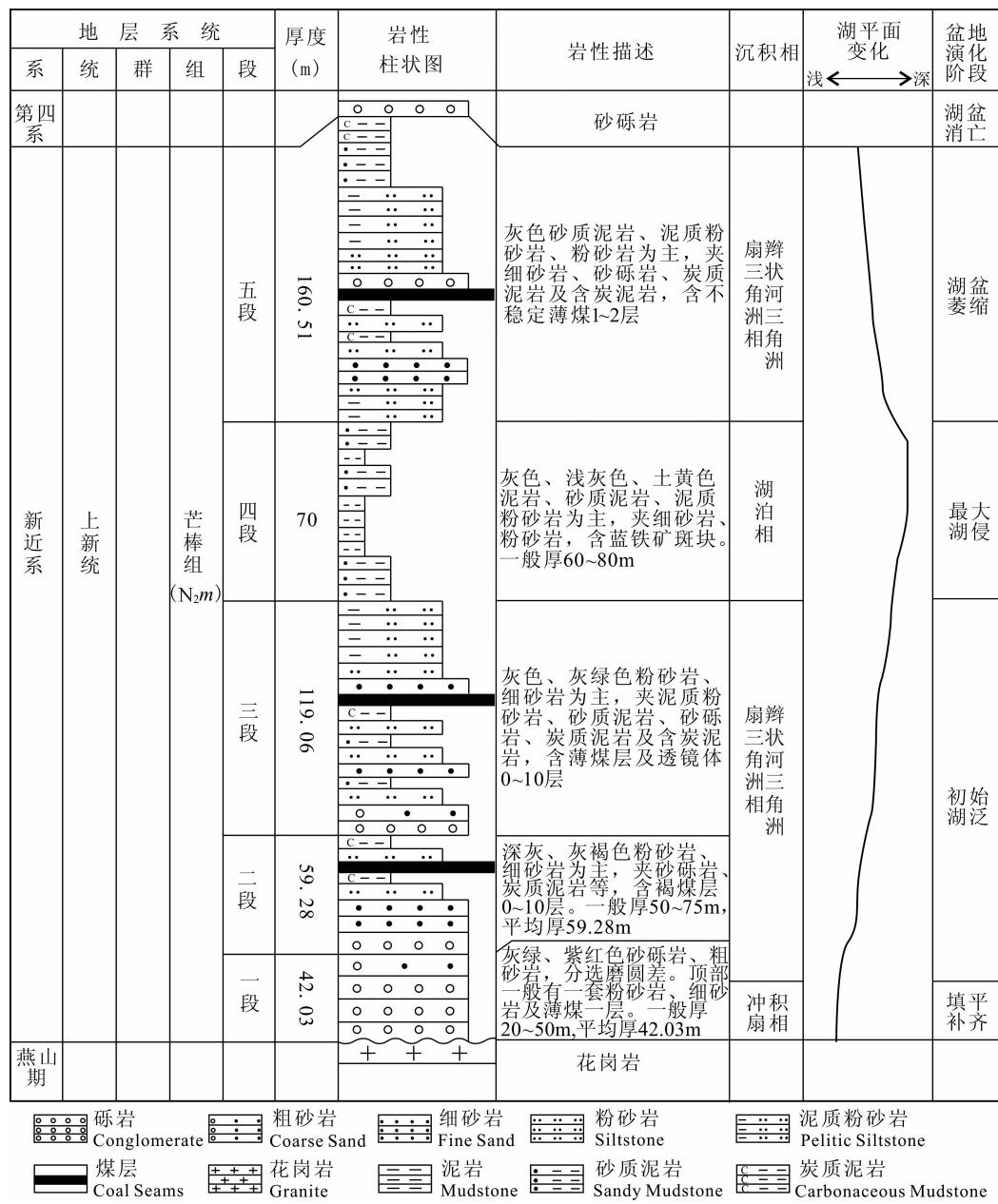


图 2 户撒盆地芒棒组综合柱状图

Fig. 2 The synthetic histogram of the Mangbang Formation in Husa basin

反映沉积岩中碳酸盐含量, CaO 比 MgO 含量高, 说明方解石丰度大于白云石丰度。 K_2O 含量为 4.96%~7.08%, 平均 5.82%, Na_2O 含量为 0.68%~1.36%, 平均 0.11%。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值是沉积岩中钾长石和钾云母含量与斜长石含量的度量, 是杂砂岩和长石砂岩的判别指标, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 4.15\% \sim 7.91\%$, 比值较大, 指示钾长石或者富钾矿物含量较多。样品具少量 MnO 和 P_2O_5 含量, 推断有重矿物(磷灰石、绿帘石)存在。主量元素常应用于砂岩地球化学分类(Herron, 1988), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值反映了石英、黏土矿物对长石类矿物成

分的富集程度, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值反映了砂岩的化学成熟度, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ 比值反映了砂岩在风化过程中铁、镁质矿物的稳定程度(Zhao Yingli et al., 2012), 在 $\text{Lg}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)-\text{Lg}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 判别图上(图 3), 样品主要为杂砂岩和长石砂岩, 少量为页岩。

样品 SiO_2 与 Fe_2O_3 、 MgO 呈显著负相关性(相关系数分别为 -0.764, -0.749), SiO_2 与 TiO_2 、 P_2O_5 呈一定负相关性(相关系数分别为 -0.173, -0.245), 表明细砂岩中石英及硅酸盐矿物的含量较大程度上影响了全岩的化学性质。 SiO_2 与 Al_2O_3

表 1 户撒盆地芒棒组砂岩主量(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析数据表Table 1 Constant elements (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of sandstones of the Mangbang Formation, Husa basin

样号	zk-01	zk-02	zk-03	zk-04	zk-05	zk-06	zk-07	zk-08	zk-09	zk-10	zk-11	zk-12	zk-13	zk-14	zk-15	zk-16	zk-17
SiO ₂	66.02	73.12	73.72	74.38	70.70	68.72	67.70	69.47	68.16	52.51	68.01	68.59	70.65	68.37	64.19	59.32	72.93
Al ₂ O ₃	16.20	13.09	12.27	12.53	13.77	15.13	14.68	13.57	15.21	25.41	15.57	14.95	13.96	15.63	17.31	20.89	12.62
Fe ₂ O ₃	2.91	2.19	1.29	2.20	3.02	2.99	3.95	3.55	3.10	4.20	3.29	3.29	3.16	3.13	3.64	4.15	2.72
MgO	0.70	0.52	0.26	0.47	0.53	0.74	0.84	0.62	0.63	0.89	0.71	0.65	0.62	0.62	0.75	0.83	0.53
CaO	1.10	0.83	1.04	0.90	2.23	1.41	2.46	2.33	1.45	2.02	1.29	1.43	1.40	1.29	1.58	1.77	1.92
Na ₂ O	0.89	0.96	0.68	0.82	1.09	1.12	1.36	1.14	1.11	1.15	1.21	1.14	1.07	1.03	1.30	1.28	1.12
K ₂ O	5.15	7.08	5.37	6.32	5.72	6.82	5.66	6.19	5.95	5.06	6.46	6.23	6.19	5.72	5.83	5.31	5.63
MnO	0.04	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
TiO ₂	0.54	0.52	0.47	0.48	0.90	0.70	1.02	0.90	0.51	0.50	0.58	0.65	0.65	0.67	0.68	0.66	0.68
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.08	0.06	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.07	0.06
LOI	6.40	1.59	4.82	1.80	1.89	2.25	2.12	1.57	3.28	7.59	2.76	2.94	2.17	3.44	4.58	5.63	1.71
总计	100.0	99.96	99.97	99.97	99.96	99.98	99.94	99.48	99.49	99.42	99.98	99.95	99.96	99.99	99.95	99.96	99.96
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.08	5.59	6.01	5.94	5.13	4.54	4.61	5.12	4.48	2.07	4.37	4.59	5.06	4.37	3.71	2.84	5.78
Fe ₂ O ₃ /K ₂ O	0.57	0.31	0.24	0.35	0.53	0.44	0.70	0.57	0.52	0.83	0.51	0.53	0.51	0.55	0.62	0.78	0.48
CIA	69.92	59.97	63.71	61.25	60.85	62.37	61.53	59.06	64.64	75.81	63.94	63.35	62.12	66.53	66.93	71.95	59.80
ICV	0.70	0.93	0.74	0.90	0.98	0.91	1.05	1.09	0.84	0.55	0.87	0.90	0.94	0.80	0.80	0.67	1.00
La	78.40	47.30	52.20	68.60	72.90	116.0	283.0	54.10	91.50	72.10	74.80	90.00	95.30	116.0	70.80	84.30	205.0
Ce	126.0	82.2	93.4	110.0	99.5	190.0	483.0	65.9	141.0	118.0	121.0	150.0	153.0	180.0	121.0	139.0	356.0
Pr	15.90	9.39	10.30	13.40	12.60	24.70	58.30	10.10	17.70	13.90	14.70	17.20	18.40	21.40	14.30	17.70	42.10
Nd	54.90	32.60	35.40	46.50	40.90	84.60	197.0	33.80	59.50	48.00	50.10	59.90	63.20	71.70	51.00	64.90	140.0
Sm	8.86	5.44	5.47	7.08	5.75	13.50	27.90	5.17	8.91	7.34	8.09	9.45	9.69	10.30	8.77	11.70	19.60
Eu	1.25	1.00	0.94	1.00	0.86	1.82	2.46	0.85	1.19	1.23	1.24	1.32	1.36	1.29	1.33	1.72	1.80
Gd	7.64	4.67	4.89	6.17	5.00	12.20	25.30	4.33	8.27	6.29	7.32	8.40	8.89	9.25	7.48	10.20	17.90
Tb	1.27	0.76	0.75	0.94	0.78	1.96	3.69	0.68	1.22	0.97	1.13	1.29	1.33	1.31	1.24	1.71	2.58
Dy	6.33	3.90	3.74	4.54	3.70	9.85	16.90	3.31	5.93	4.61	5.70	6.31	6.49	6.07	6.39	8.76	11.80
Ho	1.16	0.72	0.70	0.84	0.69	1.83	3.17	0.59	1.08	0.80	1.01	1.20	1.18	1.14	1.22	1.62	2.22
Er	3.13	1.96	1.92	2.39	1.89	5.02	9.09	1.73	3.09	2.26	2.90	3.37	3.33	3.34	3.36	4.40	6.40
Tm	0.52	0.33	0.32	0.39	0.32	0.83	1.48	0.29	0.50	0.35	0.48	0.59	0.55	0.55	0.55	0.78	1.11
Yb	3.23	2.13	1.93	2.44	1.98	5.20	9.53	1.89	3.18	2.37	3.02	3.62	3.59	3.47	3.55	4.63	7.01
Lu	0.40	0.27	0.27	0.32	0.26	0.67	1.18	0.24	0.40	0.30	0.40	0.47	0.47	0.46	0.47	0.62	0.93
LREE/HREE	12.05	12.07	13.63	13.67	15.91	11.47	14.95	13.01	13.51	14.51	12.29	12.98	13.20	15.66	11.01	9.76	15.31
Σ REE	308.9	192.7	212.2	264.6	247.1	468.2	1122	182.9	343.5	278.5	291.9	353.1	366.8	426.3	291.5	352.0	814.5
(La/Yb) _N	17.41	15.93	19.40	20.17	26.41	16.00	21.30	20.53	20.64	21.82	17.77	17.83	19.04	23.98	14.31	13.06	20.98
δ Eu	0.45	0.59	0.55	0.45	0.48	0.43	0.28	0.54	0.42	0.54	0.48	0.44	0.44	0.40	0.49	0.47	0.29
δ Ce	0.83	0.90	0.93	0.84	0.74	0.83	0.87	0.64	0.81	0.86	0.84	0.87	0.84	0.82	0.88	0.84	0.89
Li	17.80	11.50	8.75	11.40	46.40	13.20	14.90	37.90	12.90	31.10	16.90	15.60	14.70	20.10	18.70	27.10	12.60
Be	2.67	1.56	1.65	1.54	3.61	2.47	2.57	3.49	2.58	4.50	2.60	2.42	1.91	2.75	3.15	4.97	2.33
Sc	6.58	5.23	5.17	4.98	6.69	8.88	10.10	6.00	6.30	7.83	7.78	7.28	7.06	7.94	8.96	10.70	7.26
V	37.50	26.70	27.30	27.50	21.90	51.40	69.20	26.80	35.40	44.20	39.50	43.70	42.80	50.40	55.00	60.50	48.10
Cr	7.33	3.91	6.74	4.56	14.90	6.38	8.97	11.50	5.04	5.86	6.90	7.18	6.61	11.80	8.51	9.17	7.68
Co	4.74	3.44	1.36	3.09	2.84	4.83	6.21	2.66	3.90	5.28	5.01	4.84	4.53	5.11	5.16	5.93	3.78
Ni	6.80	4.25	4.07	5.51	7.83	3.83	4.73	5.97	5.62	7.22	5.67	7.14	6.98	8.93	5.96	5.00	5.45
Cu	10.50	8.19	7.25	7.95	14.00	11.70	14.50	10.10	8.87	8.36	10.40	15.60	11.00	15.00	12.10	11.80	10.30
Zn	64.20	50.90	25.80	46.80	60.50	61.60	71.40	61.30	55.30	90.40	67.30	65.80	67.00	76.40	77.30	85.40	48.60
Ga	19.30	14.40	15.70	14.20	24.00	19.60	24.30	21.90	19.00	32.20	19.50	18.70	17.90	21.40	23.60	29.50	20.50
Rb	200.0	236.0	160.0	220.0	240.0	229.0	196.0	272.0	224.0	331.0	232.0	211.0	207.0	229.0	219.0	244.0	201.0
Sr	132.0	143.0	134.0	121.0	89.8	194.0	209.0	98.9	152.0	150.0	158.0	171.0	176.0	174.0	169.0	178.0	193.0
Y	32.40	19.70	19.80	23.00	18.30	49.40	86.50	15.90	29.30	20.90	26.40	32.40	32.40	31.10	34.20	44.80	60.50
Mo	1.71	0.71	1.71	2.21	1.37	2.01	3.37	1.35	1.41	1.57	2.58	1.22	2.50	3.45	2.38	1.08	1.95
Cd	0.08	0.05	0.06	0.07	0.08	0.07	0.10	0.07	0.05	0.06	0.09	0.08	0.08	0.06	0.07	0.08	0.07
Sb	0.10	0.05	0.12	0.11	0.29	0.10	0.16	0.12	0.07	0.14	0.12	0.16	0.11	0.14	1.08	0.11	0.13
Cs	4.51	3.28	2.86	3.25	6.27	2.99	2.59	7.46	3.72	9.91	4.52	3.70	3.35	4.37	4.60	6.15	3.54
Ba	695.0	924.0	749.0	708.0	606.0	1104	884.0	673.0	629.0	417.0	852.0	852.0	945.0	868.0	765.0	610.0	933.0
W	1.38	0.78	1.70	0.95	3.03	1.37	1.49	2.85	1.08	0.89	1.41	2.98	1.59	2.21	0.90	1.29	1.65

续表 1

样号	zk-01	zk-02	zk-03	zk-04	zk-05	zk-06	zk-07	zk-08	zk-09	zk-10	zk-11	zk-12	zk-13	zk-14	zk-15	zk-16	zk-17
Re	0.00	0.01	0.01	—	—	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	—	—	—	—	—	—
Tl	1.35	1.48	1.04	1.39	1.47	1.55	0.97	1.70	1.48	2.24	1.61	1.43	1.33	1.36	1.37	1.71	1.31
Pb	44.90	48.50	44.30	47.80	38.00	54.70	49.60	38.20	49.30	53.40	54.00	50.20	47.60	49.60	49.50	57.20	47.10
Th	35.60	23.40	25.40	34.90	35.00	86.90	256.0	26.60	51.20	58.20	38.20	89.00	43.90	76.20	44.70	57.60	98.00
U	4.43	3.40	3.25	3.88	5.96	7.28	28.40	4.89	5.52	8.09	5.07	10.30	4.32	6.30	6.91	7.46	8.90
Th/U	8.04	6.88	7.82	8.99	5.87	11.94	9.01	5.44	9.28	7.19	7.53	8.64	10.16	12.10	6.47	7.72	11.01
Th/Sc	5.41	4.47	4.91	7.01	5.23	9.79	25.35	4.43	8.13	7.43	4.91	12.23	6.22	9.60	4.99	5.38	13.50
La/Sc	11.91	9.04	10.10	13.78	10.90	13.06	28.02	9.02	14.52	9.21	9.61	12.36	13.50	14.61	7.90	7.88	28.24

注: $ICV = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$, 据 Cox et al. (1995)。 $CIA = 100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 其中 CaO 为硅酸盐矿物中的 CaO , 据 Nesbitt et al. (1982)。

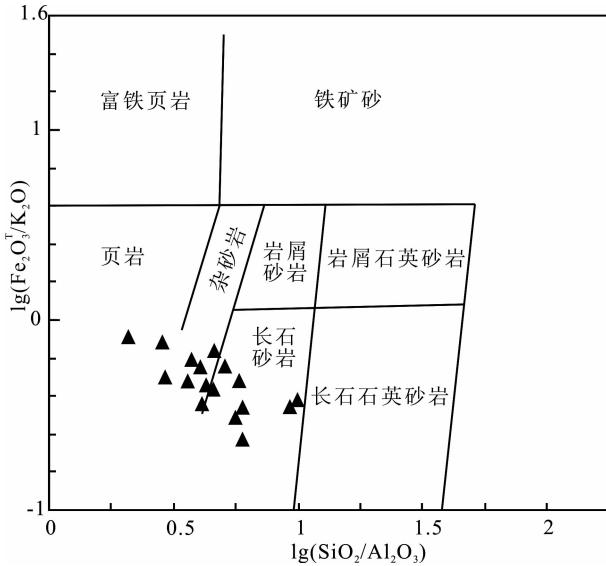


图3 户撒盆地芒棒组砂岩主量元素 $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{K}_2\text{O})$ 图解(据 Herron, 1988)

Fig. 3 $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{K}_2\text{O})$ diagram for sandstone classification of the Mangbang Formation, Husa basin(after Herron, 1988)

存在较强的负相关性(相关系数 $r = -0.974$), 说明样品中石英和富铝质黏土矿物含量影响了全岩地球化学特征。 Fe_2O_3 与 MgO 、 MnO 、 TiO_2 呈明显的正相关性(相关系数分别为 0.926、0.587、0.554), 反

映了样品铁镁质组分中主量元素的构成(Cullers, 2000)。由 SiO_2 - Al_2O_3 图解(图4)得出砂岩样品矿物成分主要为石英、钾长石、斜长石、伊利石等。

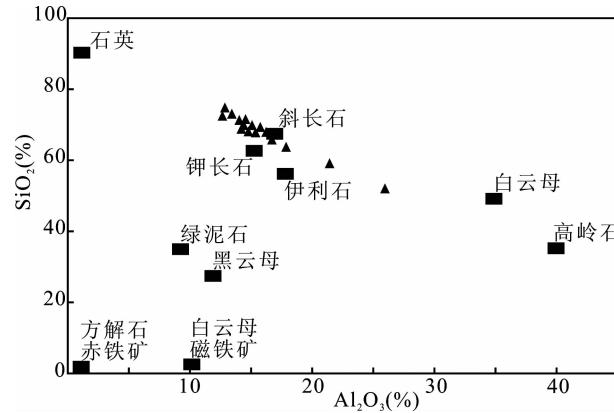


图4 户撒盆地芒棒组砂岩 SiO_2 - Al_2O_3 图解
(据 Zhang Jinliang et al. , 2007)

Fig. 4 SiO_2 vs Al_2O_3 diagram of the Mangbang Formation's sandstones, Husa basin(after Zhang Jinliang et al. , 2007)

2.3 微量元素

户撒盆地芒棒组二段细砂岩相对上地壳(据 Rudnick et al. , 2003)亲铁元素亏损 Co、Ni(富集系数分别为 0.25、0.13), 富集 Mo、Re(富集系数分别为 1.74、2.85); 亲石元素亏损 Li、Sc、V、Sr、Cr、Cs、

表2 户撒盆地芒棒组砂岩主量元素相关系数

Table 2 Correlation coefficient of the Mangbang Formation's major elements, Husa basin

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5
SiO_2	1.000									
Al_2O_3	-0.974	1.000								
Fe_2O_3	-0.764	0.653	1.000							
MgO	-0.749	0.623	0.926	1.000						
CaO	-0.354	0.158	0.653	0.453	1.000					
Na_2O	-0.363	0.167	0.686	0.606	0.907	1.000				
K_2O	0.032	-0.095	0.063	0.019	0.085	0.278	1.000			
MnO	-0.187	0.089	0.587	0.539	0.583	0.530	-0.144	1.000		
TiO_2	-0.173	0.032	0.554	0.437	0.689	0.533	0.177	0.553	1.000	
P_2O_5	-0.245	0.105	0.616	0.596	0.625	0.563	0.121	0.663	0.780	1.000

W(富集系数分别为 0.73、0.63、0.70、0.45、0.20、0.97、0.77), 富集 Th、U、Rb(富集系数分别为 6.05、2.71、2.76); 亲铜元素亏损 Cu、Zn、Cd、Sb(富集系数分别为 0.44、0.80、0.70、0.88), 富集 Pb、Ga、Tl(富集系数为 2.85、1.2、1.62)。

在球粒陨石标准化蛛网图中(图 5), 样品 REE 配分模式曲线一致, 表现为明显的右倾斜 REE 配分模式, LREE 右倾、HREE 相对平坦, 说明物源相同且稳定。样品 LREE/HREE = 9.75~15.91, 平均 13.24, $(\text{La/Yb})_N = 13.06 \sim 26.41$, 平均 19.21, 说明轻稀土元素相对重稀土元素明显富集, 稀土元素分馏明显。样品 $\delta\text{Eu} = 0.25 \sim 0.60$, 平均 0.45, 为明显的 Eu 负异常, $\delta\text{Ce} = 0.64 \sim 0.93$, 平均 0.84, 基本无 Ce 异常。

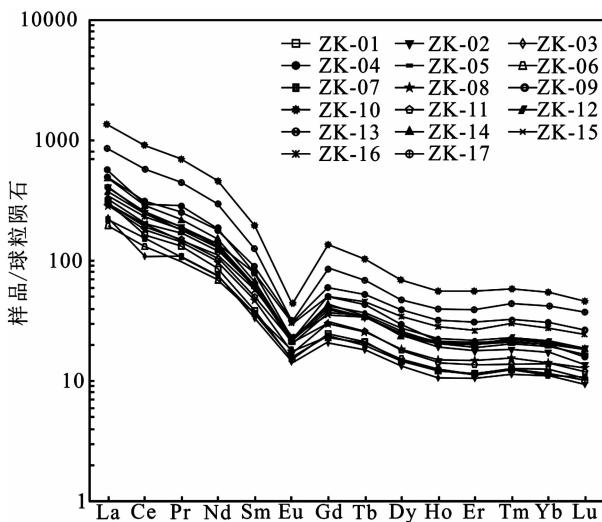


图 5 户撒盆地芒棒组砂岩稀土元素配分模式曲线
(球粒陨石数据参考 Taylor et al., 1985)

Fig. 5 REE patterns of the Mangbang Formation's sandstones, Husa basin (chondrite-normalized values after Taylor et al., 1985)

3 讨论

3.1 沉积物成熟度

碎屑沉积岩 SiO_2 主要来自于石英碎屑, Al_2O_3 主要来自于黏土矿物和长石, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值反映了沉积物中石英相对黏土矿物和长石的含量。沉积物成熟度可用 SiO_2 含量和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值来反映 (Potter, 1978), 随着石英含量增多, 长石和基性矿物减少, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值增大, 沉积物成熟度升高 (Roser et al., 1986)。样品 SiO_2 含量为 52.51%~82.35%, 平均 68.97%, 含量中等, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.06 \sim 6.01$, 平均 4.60, 比值较小说明户撒盆地芒

棒组第二段细砂岩成熟度较低, 应为快速沉积产物。

成分变异指数 ICV 可以判断碎屑沉积岩是第一次沉积物还是再循环沉积物 (Cox et al., 1995)。研究表明: 黏土矿物相对非黏土矿物具有较低的 CaO 、 NaO 、 K_2O 含量和较高的 Al_2O_3 含量。由于强烈风化条件下的第一次旋回沉积物在黏土中居留时间长, 进一步遭受风化, ICV 值减小, 因此, ICV 值低的碎屑沉积岩被认为来自含有大量黏土矿物的沉积源区, 指示被动构造环境下沉积物的再循环或者较强风化条件下的第一次旋回沉积; 相反, ICV 值高的碎屑沉积岩则指示活动构造环境下的初次沉积 (Van et al., 1985)。样品 ICV 值为 0.54~1.09, 平均 0.86, 大部分小于 1, 说明沉积源区含有较多黏土矿物, 推测沉积物为被动构造环境下沉积物的再循环沉积或者较强风化条件下的第一次旋回沉积。芒棒组沉积相研究表明: 缓坡带发育冲积扇相、辫状河三角洲相, 陡坡带发育扇三角洲相, 中部凹陷带发育滨浅湖相; 整体以辫状河三角洲、扇三角洲相展布最广, 各相带在纵横向上变化快, 表明户撒盆地新近纪构造活动强烈, 结合砂岩成熟度较低且为快速沉积产物可知样品应为被动构造环境下沉积物的再循环而成, 而非强烈风化作用过程中形成的第一次旋回沉积物。

3.2 沉积岩风化程度判别

风化作用过程中 U 元素相对 Th 元素更加活泼, 因此 Th/U 比值随着风化程度增大而增加 (Taylor et al., 1985)。样品 Th/U 比值为 5.44%~12.10%, 平均 8.48%, 比值较大, 说明源岩经历了中等程度风化。化学蚀变指数(CIA)可作为碎屑沉积岩源岩遭受风化作用强弱的指标, 并最早应用在古元古代碎屑岩的研究中 (Nesbitt et al., 1982)。碎屑沉积岩源岩在化学风化作用过程中, 不稳定矿物(长石、暗色矿物等)的 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^{2+} 等以离子形式随地表流体大量流失, 而相对稳定矿物的 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 等残留保存, 因此随着风化作用的加强, CIA 值增大。普遍认为: CIA=50~65, 反映寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化作用; CIA=65~85, 反映温暖、湿润条件下中等的化学风化作用; CIA=85~100, 反映炎热、潮湿的热带、亚热带条件下的强烈化学风化作用 (Feng Lianjun et al., 2003)。在交代作用过程中 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^{2+} 等离子同样不稳定, 影响 CIA 值, 因此在应用 CIA 值判定化学风化作用过程中需要排除交代作用的影响。 $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})-\text{K}_2\text{O}$ 判别图能够反映碎屑

沉积岩物源所经历的风化作用、交代作用及物源组分(Fedo et al., 1995)。理想条件下斜长石和钾长石风化形成黏土矿物过程应为沿着平行 A-CN 或者 A-K 一侧进行(Fedo et al., 1995; Zhao Yingli et al., 2012),也就是说岩石如果没有受到交代作用,那么风化作用将沿着 A-CN 或者 A-K 的方向进行。假设样品母岩没有经受交代作用,那么它们的风化作用将沿着平行 A-K 方向发展。A-CN-K 图中虚线表示理想风化趋势,偏离理想风化趋势表示样品 CIA 值受到交代作用影响。户撒盆地芒棒组样品投点位于理想风化趋势线左侧,说明交代作用对 CIA 值有影响(图 6)。排除交代作用的 CIA 纠正值可以在 A-CN-K 图解中得到,方法是连接 CN 端点与样品点在理想风化线上投影点的 CIA 值即为 CIA 纠正值。主量元素计算得出 CIA 值为 59~76,平均 64; CIA 纠正均值为 69,显然交代作用降低了 CIA 值。样品 CIA 纠正均值判定源岩经历了温暖、湿润条件下的中等化学风化作用,与 Th/U 比值判定结果一致。在 A-CN-K 图解中风化趋势线与斜长石和钾长石连线的交点反映了源岩的钾长石比斜长石含量高,这与主量元素含有较高的 K₂O 相吻合。

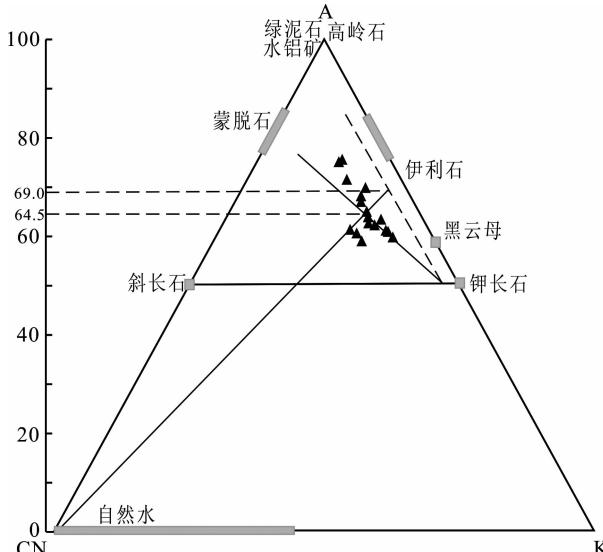


图 6 户撒盆地芒棒组砂岩 A-CN-K 判别图

(据 Sensarma et al., 2008)

Fig. 6 A-CN-K triangular diagram of the Mangbang Formation's sandstones, Husa basin
(after Sensarma et al., 2008)

3.3 物源区分析

沉积岩中 REE 以及 Th、Sc、Co 等微量元素和部分主量元素已经被广泛用于沉积岩物源区判别(Bhatia, 1983; Bhatia et al., 1986; Girty et al.,

1994)。由于岩石化学成分的影响因素较多,特别是外生地质营力,因此地球化学分析存在多解性,所以进行沉积岩物源区构造背景以及源岩属性判别中,应当选取多种判别标志综合分析(Yan Zhen et al., 2007)。

Th、Sc 和高场强元素等可以判别碎屑沉积岩源岩属性。Th/Sc=1:源岩为古老大陆上地壳;Th/Sc ≥ 1:源岩为再循环沉积岩;Th/Sc<1:源岩为年轻未分异弧(Taylor et al., 1985)。样品 Th/Sc=4.43 ~25.35, 平均 8.18, 指示样品源岩为再循环沉积岩,与本文成分成熟度和成分变异指数判定结果一致。亲石元素 K 和 Rb 含量可以反映碎屑沉积岩源岩属性(Floyd et al., 1989), 较高 K₂O 和 Re 含量指示源岩为中酸性成分;Rb-K₂O 图解投点集中,表明源岩稳定(图 7)。研究区样品 Co/Th = 0.02 ~ 0.15, 平均 0.09, 比值偏小;La/Sc = 7.88 ~ 14.61, 平均 11.16(zk-14、zk-24 由于 La 值测试明显偏大,予以剔除), 比值较大;样品 Co/Th-La/Sc 图解表明源岩为花岗岩(图 8)。

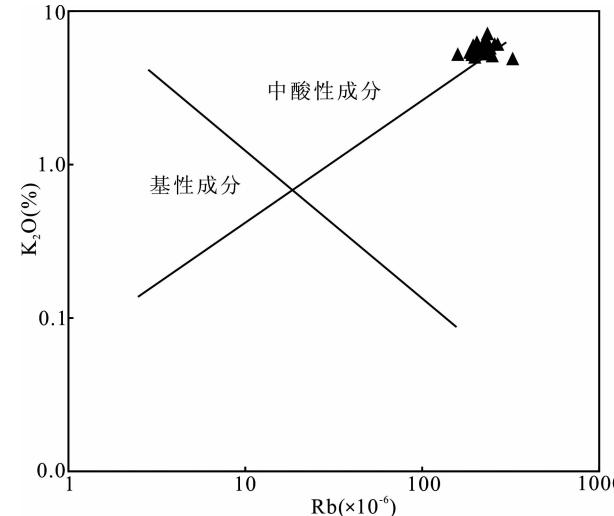


图 7 户撒盆地芒棒组砂岩 Rb-K₂O 图解

(据 Taylor et al., 1985)

Fig. 7 Rb vs K₂O diagram of the Mangbang Formation's sandstones, Husa basin (after Taylor et al., 1985)

REE 元素通常以颗粒物形式搬运且在沉积作用中比较稳定(Chen Bin et al., 2016),因此碎屑沉积岩源岩丰度以及源区风化条件是控制沉积物 REE 含量的主要因素,而搬运、沉积以及成岩等同沉积期作用和沉积期后作用对沉积物中 REE 含量影响甚微,源岩 REE 特征能够可靠地保存到沉积物中(Bhatia, 1986)。沉积岩 REE 元素是判别源区岩石的重要标志(Bhatia, 1986; Gu Xuexiang et al.,

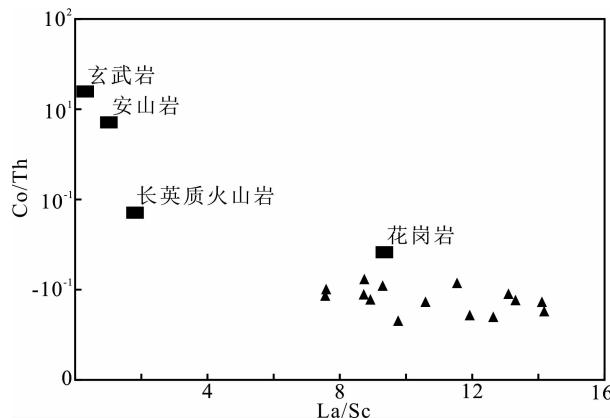


图 8 户撒盆地芒棒组砂岩 Co/Th-La/Sc 图解
(据 Gu et al., 2002)

Fig. 8 Co/Th vs La/Sc diagram of the Mangbang formation's sandstones, Husa basin (after Gu et al., 2002)

2003; Li Shuangying et al., 2004), 不同来源物质常常具有不同的 REE 配分模式曲线。运用 REE 元素判别源区岩石应当注重 REE 配分模式曲线而不是元素绝对丰度 (Zhao Zhenhua et al., 1997))。样品 REE 为明显右倾斜 REE 配分模式, LREE 右倾、HREE 平坦, 轻稀土元素相对重稀土元素明显富集, 稀土元素分馏明显, $LREE/HREE = 9.75 \sim 15.91$, 平均 13.24 , $(La/Yb)_N = 13.06 \sim 26.41$, 平均 19.21 , 样品稀土元素特征与酸性花岗岩类似。铕异常系数 (δEu) 可鉴别物质来源: 中性斜长岩具有 Eu 正异常 ($1.01 < \delta Eu < 2.33$); 玄武岩没有 Eu 异常 ($0.90 < \delta Eu < 1.0$); 花岗岩多为 Eu 负异常 ($\delta Eu < 0.90$)。户撒盆地芒棒组样品 $\delta Eu = 0.25 \sim 0.60$, 平均 0.45 , 具明显负异常, 说明其源岩为花岗岩。根据 $La/Yb-\Sigma REE$ 图解进一步说明源岩为花岗岩(图 9)。户撒盆地周缘花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 139 ± 2.3 Ma、 129 ± 5.2 Ma、 118 ± 4.2 Ma, 表明花岗岩侵入高黎贡山群时代为晚侏罗世—早白垩世。前人研究表明: 晚三叠世—晚白垩世, 腾冲地体与保山地体碰撞挤压、导致腾冲地体局部隆升; 晚白垩世—始新世缅甸地体向腾冲地体俯冲挤压, 腾冲地体早期沉积地层接受剥蚀。户撒盆地新近纪芒棒组源岩为花岗岩, 缺少早期地层物源, 且新近纪芒棒组不整合于花岗岩之上, 表明户撒盆地成盆期前早期沉积物剥蚀殆尽、仅余高黎贡山群在盆地中段两侧和北部北东区零星分布。

3.4 构造环境

表生条件下碎屑沉积岩元素地球化学行为受诸多因素影响 (Bhatia, 1983; Roser et al., 1999), 尤以

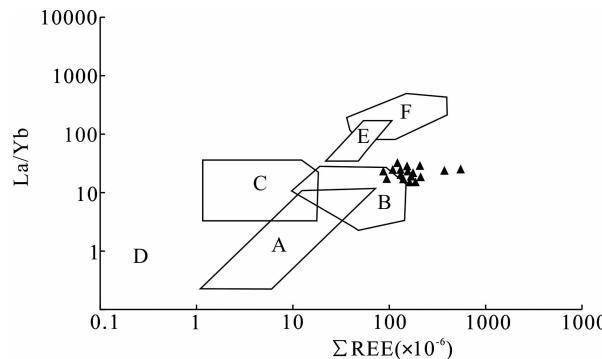


图 9 户撒盆地芒棒组砂岩 La/Yb-ΣREE 图解
(据 Allagre, 1978)

Fig. 9 La/Yb vs Σ REE diagram of the Mangbang formation's sandstones, Husa basin (after Allagre, 1978)

A—玄武岩区; B—花岗岩区; C—钙质泥岩区;
D—球粒陨石区; E—金伯利岩区; F—碳酸盐岩区
A—Basalt; B—granite; C—calcic; D—chondrites;
E—kimberlite; F—carbonate

构造环境和物源特征影响为重 (He Zhengjun et al., 1988)。构造环境既控制碎屑沉积岩的物质来源, 又影响元素在风化、剥蚀、搬运以及沉积过程中的聚集丰度和分馏程度。不同构造环境对应不同的碎屑沉积岩地球化学特征, 因此分析碎屑沉积岩地球化学特征可以有效地恢复盆地构造属性, 追索物质来源 (Wang Congshan et al., 2016)。沉积盆地构造环境主要有四种类型: 大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘。随着构造环境由被动大陆边缘—活动大陆边缘—大陆岛弧—大洋岛弧转变, 碎屑沉积岩主量元素 TiO_2 含量和 Al_2O_3/SiO_2 比值增高, 而 K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 比值降低 (Bhatia, 1983)。La、Th、Y、Zr、Ti、Co、Ni 等微量元素具不活泼性, 由物源区到沉积成岩区基本不变。随着构造环境由大洋岛弧—大陆岛弧—活动大陆边缘—被动大陆边缘转变, 碎屑沉积岩轻稀土元素 La、Ce、Nd, 微量元素 Th、Nb 含量和 Ba/Sr、Rb/Sr、La/Y 比值升高, 而 V、Sc 含量以及 Ba/Rb、K/Th 和 K/U 比值降低 (Bhatia et al., 1986)。样品在 La-Th-Sc 图解、 $(K_2O/Na_2O)-SiO_2$ 图解、 $(Fe_2O_3^T + MgO)-TiO_2$ 图解和 $(Fe_2O_3^T + MgO)-Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 图解中指示为被动大陆边缘环境 (图 10)。研究表明: 碎屑沉积岩地球化学特征只能反映物源区的构造背景, 而不能反映沉积盆地构造背景 (Rollinson, 1993), 因此户撒盆地芒棒组源岩形成于被动大陆边缘环境。户撒盆地周缘花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 139 ± 2.3 Ma、 129 ± 5.2 Ma、 118 ± 4.2 Ma, 表明花岗岩侵入高黎贡

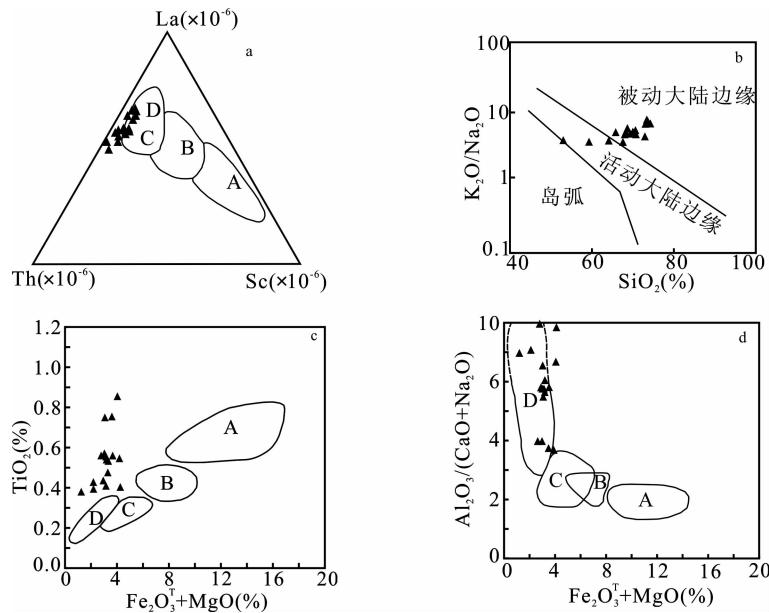


图 10 户撒盆地芒棒组砂岩构造环境判别图 La-Th-Sc 图解(a)(据 Bhatia, 1986)、(K_2O/Na_2O)- SiO_2 图解(b)
(据 Roser et al., 1986)、($Fe_2O_3^T + MgO$)- TiO_2 图解(c)(据 Bhatia, 1983)、($Fe_2O_3^T + MgO$)- $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$
图解(d)(据 Bhatia, 1983)

Fig. 10 Tectonic setting discrimination of the Mangbang Formation's sandstones, Husa basin base on La-Th-Sc
(a) (after Bhatia, 1986), (K_2O/Na_2O)- SiO_2 (b) (after Roser et al., 1986), ($Fe_2O_3^T + MgO$)- TiO_2
(c) (after Bhatia, 1983), ($Fe_2O_3^T + MgO$)- $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ (d) (after Bhatia, 1983)

A—大洋岛弧;B—大陆岛弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘

A—Oceanic island arc; B—continental island arc; C—active continental margins; D—passive continental margins

山群时代为晚侏罗世—早白垩世;花岗岩形成于被动大陆边缘环境,且腾冲地体晚侏罗世—早白垩世沉积稳定碳酸盐岩,说明中特提斯洋在晚侏罗世—早白垩世已经打开且长期稳定,与前人研究认识一致。

古特提斯洋经历了“早泥盆世初始洋盆打开”,“石炭纪—早二叠世洋盆扩张”,“晚二叠世—早三叠世洋盆关闭”一个较为完整的威尔逊旋回(Dai Fusheng, 1988)。早二叠世冈瓦纳大陆进一步裂解形成腾冲地体、保山地体,中特提斯洋初始形成;晚二叠世腾冲地体、保山地体局部发生初始碰撞,中特提斯洋闭合。中三叠世—中侏罗世,中特提斯洋再一次打开形成一定规模的大洋盆地,早白垩世中特提斯洋逐渐闭合(Zhong Dakui, 1998)。腾冲地体主要有三期岩浆活动:寒武纪—奥陶纪板内伸展运动及岩浆活动,二叠纪—三叠纪板内伸展运动及岩浆活动,侏罗纪—白垩纪板内伸展运动及岩浆活动(Bai Xianzhou et al., 2012)。

早白垩世后,中特提斯洋逐渐再次闭合,腾冲地体构造性质发生转换,由早期拉张环境过渡为汇聚、挤压环境。晚白垩世—始新世,缅甸地体沿葡萄—密

支那缝合线向腾冲地体俯冲挤压,腾冲地体持续隆升剥蚀,构造性质由单一挤压渐变为剪切挤压(Kan Rongju et al., 1996; Duan Jianzhong et al., 2000; Cheng Yang et al., 2015),发育北东—南西向走滑—挤压断裂。随着印度板块持续俯冲于欧亚板块之下,腾冲地体过渡为板内伸展作用阶段,地壳减薄,软流圈上涌,地幔发生减压熔融,形成玄武质岩浆,岩浆通过早期走滑—拉张断裂上涌,部分涌出地表,梁河、芒东、勐连、龙川江、腾冲等盆地芒棒组发育火山岩即为玄武质岩浆上涌形成。综合分析可得:户撒盆地源岩为花岗岩,于晚侏罗世—早白垩世侵入高黎贡山群。早白垩世后中特提斯洋逐渐闭合、碰撞,腾冲地体隆升剥蚀。渐新世末,户撒地区早期地层剥蚀殆尽,花岗岩出露,仅余高黎贡山群变质岩零星分布。晚白垩世—始新世,腾冲地体由单一挤压环境渐变为剪切—挤压环境,发育北东—南西向走滑—挤压断裂;随着印度板块持续俯冲于欧亚板块之下,腾冲地体过渡为板内伸展作用阶段,早期走滑—挤压断裂逐渐转变为走滑—拉张断裂,沿早期户撒走滑—挤压断裂拉张形成户撒盆地,并接受周缘晚侏罗世—早白垩世花岗岩沉积。

4 结论

(1) 户撒盆地芒棒组第二段砂岩主要为长石砂岩、杂砂岩, 少量为页岩。矿物成分主要为石英、钾长石、斜长石、伊利石等。REE 配分模式曲线一致, 为明显的右倾斜 REE 配分模式, 轻稀土元素相对重稀土元素明显富集, 稀土元素分馏明显。砂岩为被动构造环境下沉积物的再循环而成, 而非强烈风化作用过程中形成的第一次旋回沉积物。源岩经历了温暖、湿润条件下的中等化学风化作用。样品交代作用降低了 CIA 值, 源岩钾长石比斜长石含量高。

(2) 户撒盆地芒棒组第二段砂岩源岩为花岗岩, 于晚侏罗世—早白垩世侵入高黎贡山群。花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 139 ± 2.3 Ma、 129 ± 5.2 Ma 和 118 ± 4.2 Ma, 形成构造背景为被动大陆边缘环境, 对应中特提斯洋在晚侏罗世—早白垩世已经打开且长期稳定。户撒盆地在第三纪成盆期前早期地层剥蚀殆尽, 花岗岩出露, 仅余高黎贡山群在盆地中段两侧和北部北东区零星分布。

(3) 晚白垩世—始新世, 腾冲地体由单一挤压环境渐变为剪切-挤压环境, 发育北东—南西向走滑-挤压断裂; 随着印度板块持续俯冲于欧亚板块之下, 腾冲地体过渡为板内伸展作用阶段, 早期走滑-挤压断裂逐渐转化为走滑-拉张断裂, 沿早期户撒走滑-挤压断裂拉张形成户撒盆地, 并接受周缘晚侏罗世—早白垩世花岗岩沉积。

References

- Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chemical Geology*, 216(3):249~270.
- Allagre C J. 1978. Quantitative models of trace planet. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1):1~25.
- Bai Xianzhou, Jia Xiaochuan, Yang Xuejun, Xiong Changli, Liang Bin, Huang Baixin, Luo Gai. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks in Longling-Ruili fault belt, western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 31(2~3):297~305 (in Chinese with English abstract).
- Bauluz B, Mayayo M J, Fernandez-Nieto C, Lopez J M G. 2000. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic siliciclastic rocks from the Iberian Range (NE Spain): implications for source-area weathering, sorting, provenance, and tectonic setting. *Chemical Geology*, 168(1):135~150.
- Bhatia M R. 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6):611~627.
- Bhatia M R. 1986. Morphological structure of bismuth-doped n-type amorphous germanium sulphide semiconductors. *Journal of Materials Geology*, 5:1281~1284.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2):181~193.
- Cai Yuqi, Li Mangen. 2002. Discussion on the genesis and mineralization of sandstone type uranium deposit in the southern-central Longchuanjiang basin, western Yunnan province. *Journal of East China Geological Institute*, 25(2):124~127 (in Chinese with English abstract).
- Chen Gang. 1999. Terrigenous clastic composition and its tectonic feature in the Mesozoic of the Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(3):409~413 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Li Yong, Wang Weiming, Li Haibing, Su Dechen, Yan Zhaokun. 2016. The provenance and tectonic setting of Late Triassic Xujiahe Formation in the Longmenshan foreland basin, SW China. *Acta Geologica Sinica*, 90(5):857~872 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yang, Song Yucai, Xue Chuandong, Huang Shiqiang. 2015. A synthetic study of veins structure and mineralogenetic epoch of Maocaoping vein-type Cu deposit, western Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 89(3):583~598 (in Chinese with English abstract).
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 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 R L. 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.
- Dai Fusheng. 1988. Physicochemical conditions of two types Tin deposit mineralization related to Western Yunnan granite. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, (3):19~20 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jiemin. 1994. Fracture-Hydrothermal deposition origin of sandstone uranium deposits in west Yunnan. *Geochimica*, 23:76~83 (in Chinese with English abstract).
- Dickinson W R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. *Provenance of arenites*. Springer Netherlands, 333~361.
- Duan Jianzhong, Tan Xiaohong. 2000. The nature and feature of Cenozoic main strike-slip fault in the three-river. *Acta Geologica Sinica. Yunnan Geology*, 19(1):8~231 (in Chinese with English abstract).
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10):921~924.
- Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, Zhang Tonggang. 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 Xuedong, Lü Hongbo, Zhang Haichun, Zhang Yuxu, Dong Xiaopeng, Tang Ke, Zhu Guifan, Zheng Daran, Li Sha, Zhang Qi, Wang Jun, He Jing, Chen Kangli, Qin Beibei. 2017. An analysis on the Early Cretaceous paleocurrent direction in the Celaomiao depression, Urad Rear Banner, Inner Mongolia, China. *Geological Review*, 63(2): 277~286 (in Chinese with English abstract).
- Floyd P A, Winchester J A, Park R G. 1989. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland. *Precambrian Research*, 45(1~3): 203~214.
- Girty G H, Hanson A D, Knaack C, Johnson D. 1994. Provenance determined by REE, Th, and Sc analyses of metasedimentary rocks, Boyden Cave roof pendant, central Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 64(1): 68~73.
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, Tang J X, Qi L. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393~407.
- Gu Xuexiang, Liu Jianming, Schulz O, Vavat F, Zheng Minghua. 2003. Geochemical constraints on the tectonic setting of the Proterozoic turbidites in the XueFeng Uplift region of the Jiangnan orogenic belt. *Geochimica*, 32(5): 406~421 (in Chinese with English abstract).
- He Zhengjun, Li Jinyi, Mo Shenguo, Sorokin A A. 1988. Tectonic setting of geochemical characteristics and provenance analysis of the sandstones in Mohe foreland basin. *Science in China(D)*, 33(12): 1219~1226 (in Chinese with English abstract).
- Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 820~829.
- Johansson M J. 1993. The system controlling the composition of clastic sediments. *Geological Society of America Special Papers*, 284: 1~20.
- Kan Rongju, Zhao Jiming, Kan Dan. 1996. The tectonic evolution and volcanic eruption in Tengchong volcano-geothermic region. *Seismological and geomagnetic observation and research*, 17(4): 28~33 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuangying, Li Renwei, Yue Shucang, Wang Daoxuan, Liu Yin, Meng Qingren, Jin Fuquan. 2004. Geochemistry of Mesozoic detrital rocks and its constraints on provenance in FeiXi area, Anhui provence. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 667~676 (in Chinese with English abstract).
- Li Guoxin, Sun Zexuan, Yao Yifeng, Chen Yong. 2005. Characteristics of uranium mineralization in Longchuanjiang basin, western Yunnan. *Uranium Geology*, 21(5): 268~274 (in Chinese with English abstract).
- Li Zaihui, Wang Liquan, Lin Shiliang, Cong Feng, Xie Tao, Zou Guangfu. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of granitic mylonite in the Gaoligong shear zone of western Yunnan Province and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1287~1295 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, Maynard J B. 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(7): 2015~2050.
- McLennan S M, Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *Journal of Geology*, 99(1): 1~21.
- Marsaglia K M, Ingwersen R V. 1992. Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: a reassessment of magmatic-arc provenance. *Geological Society of America Bulletin*, 104(12): 1637~1649.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715~717.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen, Yan Yangji, Xu Xiaosong, Xu Qiang, Peng Yongmin. 1997. *Geological-tectonic Evolution in the Eastern Tethys*. Beijing: Geological Publishing House, 121~128 (in Chinese).
- Pei Xianzhi, Hu Nan, Liu Chengjun, Li Ruobao, Li Zuochen, Chen Youxin, Pei Lei, Liu Zhanqing, Chen Guochao, Yang Jie. 2015. Detrital composition, geochemical characteristics and provenance analysis for the Maerzheng Formation sandstone in Gerizhuotuo area, southern margin of East Kunlun region. *Geological Review*, 61(2): 307~323 (in Chinese with English abstract).
- Potter P E. 1978. Petrology and chemistry of modern big river sands. *The Journal of Geology*, 86(4): 423~449.
- Ren Junping, Zuo Libo, Xu Kangkang, Wang Jie, Liu Xiaoyang, He Shengfei, Liu Yu, He Fuqing. 2016. Geodynamic evolution and mineral resources present research in Bangweulu block, Northern Zambia. *Geological Review*, 62(4): 979~996 (in Chinese with English abstract).
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using content and ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635~650.
- Rollinson H R. 1993. *Using geological Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Longman Scientific Technical Press, 1~352.
- Roser B P, Korsch R J. 1999. Geochemical characterization, evolution and source of a Mesozoic accretionary wedge, the Torlesse Terrane, New Zealand. *Geological Magazine*, 136(5): 493~512.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. *Treatise Geochem*, 3: 1~64.
- Sensarma S, Rajamani V, Tripathi J K. 2008. Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, Southern India: Implications for provenance and weathering processes. *Sedimentary Geology*, 205(3): 111~125.

- Sun Zexuan, Guo Lin, Xiang Qingyou. 1999. Analysis on metallogenetic conditions and prospect of sandstone-type uranium deposits in Longchuan basin western Yunnan. *Uranium Geology*, 15(2):65~70 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zexuan, Chen Hongde, Zhu Xiyang, Wang Sili, Chen Yong. 2006. Present situation of exploration and prospecting potential of sandstone-type uranium deposits in Cenozoic basins, western Yunnan. *Acta Geologica Sichuan*, 26(1):25~29 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zexuan, Chen Hongde, Wu Ying, Yao Yifeng. 2006. The Cenozoic basins and sandstone-type uranium mineralization in western Yunnan. *Geological Review*, 52(4): 494~499 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 312.
- Van de Kamp P C, Leake B E. 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 76(04):411~449.
- Wang Congshan, Chen Wenxi, Shan Fulong. 2016. Geochemical characteristic of the Xungba Formation sandstones in the Xungba Basin, Tibet, and its constraints on provenance and tectonic setting. *Acta Geologica Sinica*, 90(6):1195~1207 (in Chinese with English abstract).
- Wu Hao. 2016. The sedimentary characteristic research of the potential uranium reservoirs of the Neogene Mangbang Formation in Husa basin, western Yunnan province. M. S. Dissertation. Chinese Academy of Geological Sciences, 27~29 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qijun, Xu Yigang, Huang Xiaolong, LuoZhenyu. 2006. Chronology and geochemistry of granite in the Gaoligong tectonic belt, western Yunnan: Tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(04):817~834 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Wang Tao, Yan Quanren, Xiao Wenjiao, Han Fanglin, Chen Junlu. 2007. Tectonic setting of Devonian sediments in the Qinling orogen: Constraints from detrital modes and geochemistry of clastic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):1023~1042 (in Chinese with English abstract).
- Zerfass H, Chemale F, Schultz C L, Lavina E. 2004. Tectonics and sedimentation in Southern South America during Triassic. *Sedimentary Geology*, 166(3):265~292.
- Zhang Jinliang, Zhang Xin. 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).
- Zhao Zhenhua, Zhou Lingdi. 1997. REE geochemistry of some alkali-rich intrusive rocks in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 40(2):145~158.
- Zhao Baoguang, Chen Youliang, Yao Yifeng, Chen Zhiguo, Du Xiaolin. 2003. Depositional features of Cenozoic basins and metallogenetic conditions of sandstone-type uranium deposits in western Yunnan. *Uranium Geology*, 19(6): 344~348 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yingli, Liu Yongjiang, Han Guoqing, Wu Linna, Li Weimin, Wen Quanbo, Liang Chenyue. 2012. Geochemical characteristics of major elements in the Permian sandstones from the central and southern Great Xing'an Ranges and discriminations on their tectonic environment of the provenance. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(2):285~297 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Dakui. 1998. *The Ancient Tethys Orogenic Belt in Western Yunnan*. Beijing: Science Press.
- Zhu Xiyang, Sun Zexuan, Cheng Hongde, Hou Mincai, Li Guoxin. 2004. Characteristics of sedimentary system and sandstone-type uranium mineralization in Longchuanjiang basin, western Yunnan. *Journal of Chengdu University of Technology(Natural Science Edition)*, 31(3):267~272 (in Chinese with English abstract).
- Zou Guangfu, Mao Ying, Zou Xin, Lin Shiliang, Cong Feng, Li Zaihui, Xi Tao, Gao Yongjuan. 2013. Zircon U-Pb age and geochemistry of Jiangdong intrusion and its tectonic implications in the Mangshi, western Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 87(11):1635~1646 (in Chinese with English abstract).
- ## 参 考 文 献
- 白究洲,贾小川,杨学俊,熊昌利,梁斌,黄柏鑫,罗改. 2012. 滇西龙陵—瑞丽断裂带早白垩世火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和地球化学特征. *地质通报*, 31(2~3):297~305.
- 蔡煜琦,李满根. 2002. 滇西龙川江盆地中南部砂岩型铀矿成矿特征及成因探讨. *华东地质学院学报*, 25(2):124~127.
- 陈刚. 1999. 中生代鄂尔多斯盆地陆源碎屑成分及其构造属性. *岩石学报*, 17(3): 409~413.
- 程杨,宋玉财,薛传东,黄世强. 2015. 滇西茅草坪脉状铜矿床脉体构造与成矿时代研究. *地质学报*, 89(3): 583~598.
- 戴福盛. 1988. 滇西与花岗岩有关的两类锡矿床成矿的物理化学条件. *矿物岩石地球化学通报*, (3): 19~20.
- 陈斌,李勇,王伟明,李海兵,苏德辰,颜照坤. 2016. 晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组物源及构造背景分析. *地质学报*, 90(5): 857~872.
- 戴杰敏. 1994. 滇西砂岩铀矿的断裂—热水成因特征. *地球化学*, 23: 76~83.
- 段建中,谭筱虹. 2000. 滇西三江地区新生代主要走滑断裂性质及特征. *云南地质*, 19(1): 8~231.
- 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. *地学前缘*, 10(4):539~544.
- 冯雪东,吕洪波,张海春,章雨旭,董晓鹏,唐轲,朱桂繁,郑大燃,李莎,张琦,王俊,贺静,陈康力,秦贝贝. 2017. 乌拉特后旗测老庙坳陷早白垩世古流向分析. *地质论评*, 63(2): 277~286.
- 顾雪祥,刘建明, Schulz O, Vavat F, 郑明华. 2003. 江南造山带雪峰隆起区元古宙浊积岩沉积构造背景的地球化学制约. *地球化学*, 32(5): 406~421.

- 和政军,李锦轶,莫申国,Sorokin A A. 1988. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析. 中国科学(D),33(12): 1219~1226.
- 阙荣举,赵晋明,阙丹. 1996. 腾冲火山地热区的构造演化与火山喷发. 地震地磁观测与研究,17(4): 28~33.
- 李双应,李任伟,岳书仓,王道轩,刘因,孟庆任,金福全. 2004. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约. 岩石学报,20(3): 667~676.
- 李国新,孙泽轩,姚毅峰,陈勇. 2005. 滇西龙川江盆地铀矿化特征. 铀矿地质,21(5): 268~274.
- 李再会,王立全,林仕良,丛峰,谢韬,邹光富. 2012. 滇西高黎贡剪切带内花岗质糜棱岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地质通报,31(8): 1287~1295.
- 裴先治,胡楠,刘成军,李瑞保,李佐臣,陈有忻,裴磊,刘战庆,陈国超,杨杰. 2015. 东昆仑南缘哥日卓托地区马尔争组砂岩碎屑组成,地球化学特征与物源构造环境分析. 地质论评,61(2): 307~323.
- 潘桂棠,陈智梁,李兴振,颜仰基,许效松,徐强,彭勇民. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社.
- 任军平,左立波,许康康,王杰,刘晓阳,何胜飞,刘宇,贺福清. 2016. 赞比亚北部班韦乌卢地块演化及矿产资源研究现状. 地质论评,62(4): 979~996.
- 孙泽轩,郭林,向清友. 1999. 滇西陇川盆地砂岩型铀矿成矿条件及远景分析. 铀矿地质,15(2): 65~70.
- 孙泽轩,陈宏德,朱西养,王四利,陈勇. 2006. 滇西新生代盆地砂岩型铀矿勘查现状与找矿前景. 四川地质学报,26(1): 25~29.
- 孙泽轩,陈宏德,吴英,姚毅峰. 2006. 滇西新生代盆地与砂岩型铀矿成矿. 地质评论,52(4): 494~499.
- 王丛山,陈文西,单福龙. 2016. 西藏雄巴地区中新世雄巴组砂岩地球化学特征及对物源区,构造背景的指示. 地质学报,90(6): 1195~1207.
- 伍浩. 2016. 滇西户撒盆地新近系芒棒组潜在储油层沉积特征研究. 中国地质科学院硕士学位论文,27~29.
- 云南省地矿局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社,592.
- 杨启军,徐义刚,黄小龙,罗震宇. 2006. 高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义. 岩石学报,22(04): 817~834.
- 闫臻,王宗起,王涛,闫全人,肖文交,李继亮,韩芳林,陈隽璐. 2007. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境——来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束. 岩石学报,23(5): 1023~1042.
- 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.
- 赵宝光,陈友良,姚毅峰,陈志国,杜小林. 2003. 滇西新生代盆地沉积特征及砂岩型铀矿成矿条件. 铀矿地质,19(6): 344~348.
- 赵英利,刘永江,韩国卿,吴琳娜,李伟民,温泉波,梁琛岳. 2012. 大兴安岭中南段二叠纪砂岩主量元素地球化学特征及物源区构造环境的判别. 吉林大学学报(地球科学版),42(2): 285~297.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社.
- 朱西养,孙泽轩,陈洪德,侯明才,李国新. 2004. 滇西龙川江盆地沉积体系特征及与砂岩铀矿成矿. 成都理工大学学报(自然科学版),31(3): 267~272.
- 邹光富,毛英,邹鑫,林仕良,丛峰,李再会,谢韬,高永娟. 2013. 滇西芒市江东花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义. 地质学报,87(11): 1635~1646.

Geochemical Characteristic of Sandstones from the Mangbang Formation in the Husa Basin, Western Yunnan, and Its Constraints on Provenances and Tectonic Setting

ZHANG Jianjun^{1, 2)}, MOU Chuanlong³⁾, ZHOU Kenken³⁾, FENG Lixia⁴⁾, WU Hao³⁾, CHEN Xiaowei³⁾

1) Chinese Academy Of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) China University of Geosciences, Beijing, 100083;

3) Chengdu Geological Survey Center, Chengdu, 610081;

4) Peking University, Beijing, 100871

Abstract

Geochemical analysis was conducted in this study for sandstones samples from the Mangbang Formation in the Husa basin, western Yunnan. The analysis results show that sandstones from the Mangbang Formation mainly comprise of feldspar sandstone and greywacke sandstone as well as minor shale, and the mineral assemblage mainly contains quartz, K-feldspar, plagioclase and illite. The sandstones have a consistent REE pattern, enrichment of LREE relative to HREE, with LREE/HREE of 9.75~15.91 (averaging 13.24) and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ of 13.06~26.41 (averaging 19.21). The $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of 2.06~6.01 and index of the chemistry variation (ICV) of 0.54~1.09 together with the features of sedimentation make it clear that these sandstones resulted from recycling deposition in the passive tectonic setting, rather than the first cycle of sediments due to the relatively strong weathering. Furthermore, the Th/U values of 5.44~12.10% and CIA of 59~76 reflect a chemical weathering environment of medium intensity in warm and moist climate. A/CNK discrimination diagram shows that the sandstone clastics have a higher content of K-feldspar relative to plagioclase and low CIA value due to metasomatism. The Th/Sc ratio of 4.43~25.35 (averaging 8.18) and the diagrams of Co/Th versus La/Sc, K_2O versus Re, and La/Yb versus ΣREE all suggest that sandstones in the study area were mainly derived from the previously formed granites. Besides, the tectonic discrimination diagrams of TiO_2 versus $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ versus $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ versus SiO_2 , and La-Th-Sc all reflect that these granites were formed in the setting of passive continental margin and possibly corresponded to the long term steady state of the Meso-Tethys Ocean which has been open during the Late Jurassic to Early Cretaceous. The Husa basin was formed due to the extension along the previous Husa transpressional fault and started to deposition sourced from the peripheral granites during this period.

Key words: western Yunnan; Husa basin; geochemistry; provenance; tectonic setting