

云南个旧白沙冲和北炮台花岗岩岩石学、 地球化学研究及成因探讨

李肖龙¹⁾, 毛景文^{1,2)}, 程彦博¹⁾

1) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037

内容提要: 白沙冲岩体和北炮台岩体均位于个旧矿田的东区北段。白沙冲岩体岩性主要为黑云母花岗岩, 而北炮台岩体岩性主要为似斑状黑云母花岗岩。本文通过对白沙冲岩体、北炮台岩体进行岩石学、地球化学、Nd、Sr 同位素研究, 厘定白沙冲岩体属过铝质的高钾钙碱性花岗质岩石, 北炮台岩体属准铝质的钾玄岩系列花岗岩。两岩体均表现出亏损 Ba、Sr、Nb、P、Ti, 富集 Rb、Pb、U 的特点。白沙冲岩体稀土总量较低, 轻重稀土分馏不明显, 具强烈的铕负异常, 且具有类似于 M 型的四组分效应; 相对于白沙冲岩体, 北炮台岩体稀土总量较高, 轻重稀土分馏较明显, 具中等程度的铕负异常。Nd 同位素结果显示, 两岩体均来源于大陆地壳。地球化学特征表明, 两岩体在岩浆演化过程中均经历了结晶分异, 且白沙冲岩体的分异演化程度较高。区域内同时代花岗岩的相关资料表明, 滇东南—桂西一带在晚白垩世存在大规模的岩浆活动—成岩事件, 可能为晚中生代华南岩石圈伸展背景下的产物。

关键词: 花岗岩体; 岩石学; 岩石化学; Nd、Sr 同位素; 个旧; 云南;

云南个旧矿区是世界上规模最大的锡—铜多金属矿集区, 因其规模巨大和历史悠久而驰名中外。一直以来, “花岗岩岩浆气化热液成矿”的观点被广泛接受(汪志芬, 1983; 冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984; 邓玉书, 1984; 彭程电, 1985; 庄永秋等, 1996)。尽管对于区内层状锡矿, 尤其是与三叠纪玄武岩空间关系比较密切的层状铜矿或铜锡矿体被论证同生产物(张欢等, 2003; 黎应书等, 2006; 路红记, 2008; 杨宗喜等, 2010), 但毛景文等(2008)通过系统的野外考察和全球视野的对比研究, 认为个旧地区各类锡多金属矿、层状铜矿和电气石锡石脉、脉状铅锌银矿是与白垩纪花岗岩有关的同一成矿系统。

地质工作者对个旧矿区的花岗岩一直有足够的兴趣和重视, 很多人进行了不同程度的研究。多数人认为个旧花岗岩属于地壳重熔型(陈吉琛等, 1983; 汪志芬, 1983; 冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984; 伍勤生等, 1984; 李家和, 1985; 彭程电, 1985; 官容生, 1991; 王新光等, 1992; 戴福盛, 1996; 程彦博等, 2008a), 但是李志群(1992)、莫国培(2006)认为应归属于混熔型花岗岩, 黎应书等

(2007)则认为个旧含锡花岗岩为幔源成因。由于研究的尺度和范围等的不同, 至今还没有对马拉格矿区内的白沙冲和北炮台岩体做深入的研究, 因此本文选择这两个岩体作为研究对象, 尝试通过系统的岩石学、地球化学及 Nd、Sr 同位素研究, 并结合已有的锆石 U-Pb 年龄(程彦博等, 2009), 从而为两岩体的岩石成因提供约束。

1 区域地质背景

位于右江褶皱带西缘的个旧锡铜多金属矿区北以师宗—弥勒岩石圈断裂与扬子地块相接, 西南以红河超岩石圈断裂与特提斯构造域的三江褶皱带相邻, 是欧亚板块、太平洋板块、印度洋板块复合相接的部位(图1)(毛景文等, 2008)。南北向的个旧断裂作为小江岩石圈断裂的南延部分, 将个旧矿区分分为东、西两区。矿区出露地层以三叠系为主, 且出露较为完整, 仅缺失上统顶部。中生代以前的地层仅见二叠系上统龙潭组在矿区南部零星出露。而新生代沉积物广泛分布于山间沟谷及断陷盆地中。矿区的主要赋矿地层为中三叠统个旧组。个旧组在矿区分布广泛, 并根据岩性及岩相组合特征划分为下、

注: 本文为国家自然科学基金重点项目(编号 40930419)、国土资源部公益性行业科研专项(编号 200911007-12)、云南锡业集团有限责任公司科研项目(编号 2010-04A)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号 2-9-2010-21)的成果。

收稿日期: 2010-11-22; 改回日期: 2011-06-25; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 李肖龙, 男, 1987年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: lancermyslf@126.com。

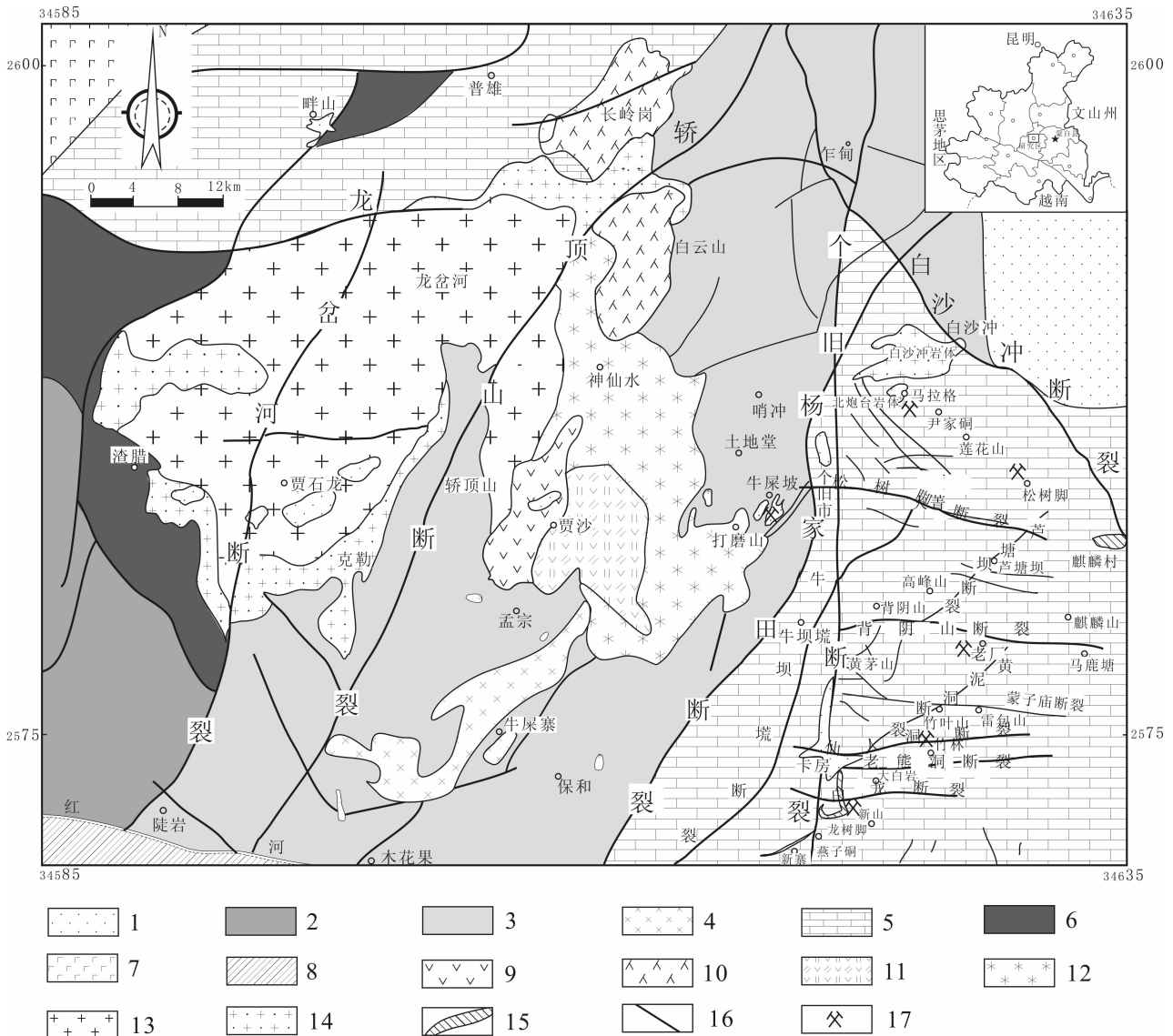


图1 个旧矿区地质简图(毛景文等,2008)

Fig. 1 Geological sketch map of the Gejiu area (Mao et al., 2008)

1—第四系;2—上三叠统火把冲组板岩、砂岩、砂砾岩;3—中三叠统法郎组砂岩、页岩夹凝灰岩;4—中三叠统法郎组变玄武质熔岩;5—中三叠统个旧组碳酸盐岩;6—下三叠统红色砂岩夹绿色砂岩、泥灰岩;7—二叠纪峨眉山玄武岩;8—哀牢山变质带;9—辉长岩;10—霞石正长岩;11—含闪长岩包体的碱长花岗岩(原二长岩);12—碱长花岗岩;13—似斑状黑云母花岗岩;14—等粒黑云母花岗岩;15—中三叠统个旧组变玄武岩;16—断层;17—矿区

1—Quaternary sediments; 2—Upper Triassic slate, sandstone and glutinite of the Huobachong Formation; 3—Middle Triassic sandstone, shale of the Falang Formation; 4—Middle Triassic basaltic lava of the Falang Formation; 5—Middle Triassic carbonate rock of the Gejiu Formation; 6—Lower Triassic purple sandstone intercalated with green sandstone and marlite of the Gejiu Formation; 7—Permian Emei Mountain basalt; 8—Ailao Mt. metamorphic zone; 9—gabbro; 10—nepheline syenite; 11—alkali feldspar granite with mafic enclaves; 12—alkali feldspar granite; 13—porphyritic biotite granite; 14—equigranular biotite granite; 15—Middle Triassic basalt of the Gejiu Formation; 16—fault; 17—mine

中、上三段(即卡房段、马拉格段和白泥洞段)共13层。个旧矿区中生代岩浆活动强烈,基性、酸性、碱性岩均有分布,它们先后侵入于三叠系中统砂页岩及碳酸盐岩中。其中基性岩体为西区的贾沙辉长岩体;酸性岩体有西区的龙岔河花岗岩体、神仙水花岗岩体及东区的白沙冲花岗岩体、马松花岗岩体、老卡

花岗岩体等;碱性岩体主要为西区的白云山岩体。在西区岩体已经大面积出露地表,面积约为320 km²,而在东区岩体多隐伏地下,仅在白沙冲、北炮台及新山等地出露。此外,矿区内还有三叠系玄武岩出露。

2 岩体地质及岩石学特征

白沙冲岩体分布于马拉格矿田北部,在地表呈东西延长的似椭圆形,出露面积约为 6.25km²。岩体侵入于个旧组灰岩及法郎组砂页岩中,其边缘由于受断裂控制而显得比较复杂。岩体中可见石英—黄铁矿—绿泥石脉及高岭石化的长石脉,在岩体与碳酸盐类岩石的接触带上常有夕卡岩分布。详细的野外及镜下观察表明,岩体的主要岩性为浅肉红色中粗粒黑云母花岗岩,边缘粒度较细。黑云母花岗岩具粒状结构,块状构造,主要有石英(30%左右)、钾长石(35%左右)、斜长石(30%左右)和黑云母(3%~5%)组成,副矿物可见锆石、磷灰石、榍石、电气石等。斜长石普遍绢云母化。

北炮台岩体位于白沙冲岩体南部,是马松岩体在地表出露的部分,出露面积约为 0.065km²,呈岩株状产出。岩体侵入于个旧组灰岩中,在岩体南侧接触带上广泛发育夕卡岩。详细的野外及镜下观察表明,岩体的岩性为似斑状黑云母花岗岩,灰色、灰白色,似斑状结构,块状构造。其中斑晶主要为钾长石(条纹长石),颜色分为灰白色和肉红色,长板状,嵌布有石英、黑云母、绢云母化斜长石等,含量为

10%~15%。基质由石英(30%左右)、钾长石(30%左右)、斜长石(25%左右)和黑云母(5%~10%)组成。副矿物可见锆石、磷灰石、榍石、褐帘石等。

3 分析方法

选择代表性新鲜样品进行主量元素、微量元素及 Nd、Sr 同位素地球化学分析。测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中主量元素使用 XRF 法测试(二价和三价铁由化学法测定),所用仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪,相对误差小于 5%;微量元素采用酸溶法,制备好的样品溶液在 ICP-MS 上测试,所用仪器为 HR-ICP-MS(Element I),德国 Finnigan-MAT 公司制造,工作温度、相对湿度分别为 20℃ 和 30%,微量元素含量大于 10 μg/g 时的相对误差小于 5%,小于 10 μg/g 时的相对误差小于 10%,详细的分析流程见相关文献(Qu et al., 2004);Nd 同位素测试依据为 GB/T17672-1999《岩石中铅铋钷同位素测定方法》,准确称取 0.1~0.2 g 粉末样品于低压密闭溶样罐中,准确加入钐钨稀释剂,用混合酸(HF + HNO₃ + HClO₄)溶解 24 h。待样品完全溶解后,蒸干,加入 6

表 1 个旧矿田白沙冲岩体黑云母花岗岩和北炮台岩体似斑状黑云母花岗岩主量元素含量(%)及特征参数

Table 1 Major elements contents (%) of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield

岩体	样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失	总量	$\frac{A}{CNK}$	A/NK	$\frac{Na_2O}{K_2O}$	$\frac{K_2O}{Na_2O}$
白沙冲岩体	M100101	67.03	16.63	0.32	1.28	3.74	0.65	4.15	0.02	0.02	0.01	6.05	99.90	1.35	2.99	4.80	6.38
	M100102	70.39	14.81	0.24	0.71	3.99	0.09	3.47	0.02	0.02	0.01	6.12	99.87	1.33	3.79	3.56	38.56
	M100103	72.76	13.47	0.55	0.53	3.65	0.08	3.40	0.02	0.03	0.01	5.35	99.85	1.29	3.53	3.48	41.98
	M100104	76.30	13.90	0.26	0.95	0.78	0.06	3.80	0.01	0.02	0.01	3.78	99.87	2.47	3.31	3.86	67.86
	M100106	68.30	15.54	0.37	0.92	4.12	1.19	2.75	0.03	0.01	0.01	6.63	99.87	1.25	3.15	3.94	2.31
	M100107	71.14	17.27	0.38	1.33	1.48	0.09	3.99	0.03	0.01	0.01	4.14	99.86	2.41	3.87	4.08	45.86
	M100108	69.66	16.25	0.43	1.38	1.75	0.07	4.15	0.01	0.01	0.01	6.23	99.95	2.09	3.53	4.22	59.29
	M100109	76.26	12.30	0.48	0.94	2.04	0.54	3.54	0.02	0.03	0.01	3.83	100.00	1.46	2.61	4.08	6.56
	M100110	75.83	12.07	0.74	0.71	1.84	1.16	3.81	0.02	0.04	0.02	3.30	99.54	1.29	2.00	4.97	3.28
	M100111	73.57	12.88	0.33	0.71	3.87	0.07	3.21	0.02	0.04	0.01	5.17	99.88	1.21	3.59	3.28	46.52
	北炮台岩体	M100113	70.64	12.93	3.65	0.92	2.27	3.09	4.80	0.07	0.55	0.27	0.76	99.95	0.90	1.26	7.89
M100114		73.09	12.50	2.32	0.56	1.50	3.16	5.24	0.05	0.32	0.17	1.01	99.92	0.92	1.15	8.40	1.66
M100116		71.86	12.81	2.81	0.67	1.76	3.21	5.37	0.05	0.41	0.19	0.80	99.94	0.90	1.16	8.58	1.67
M100118		71.78	12.60	3.08	0.81	1.76	3.14	5.24	0.06	0.46	0.21	0.80	99.94	0.90	1.16	8.38	1.67
M100119		71.82	13.16	2.81	0.68	1.60	3.18	5.45	0.06	0.40	0.19	0.61	99.96	0.94	1.18	8.63	1.71
M100120		74.68	12.26	1.66	0.38	0.94	2.95	5.73	0.04	0.22	0.11	1.00	99.97	0.96	1.11	8.68	1.94
M100121		71.36	13.05	2.56	0.68	1.76	2.99	5.46	0.04	0.37	0.19	1.44	99.90	0.93	1.21	8.45	1.83
M100122		71.72	13.12	2.98	0.86	1.70	2.77	5.32	0.06	0.43	0.19	0.79	99.94	0.98	1.27	8.09	1.92
M100124		71.65	12.58	3.12	0.86	1.86	3.04	4.73	0.06	0.46	0.22	1.31	99.89	0.93	1.24	7.77	1.56
M100125		71.63	13.00	2.68	0.77	1.59	3.00	5.25	0.05	0.38	0.18	1.39	99.92	0.96	1.22	8.25	1.75

注:其中 TFe₂O₃ 为全铁含量。

mol/L 的盐酸转为氯化物蒸干。用 0.5 mol/L 的盐酸溶液溶解,离心分离,清液栽入阳离子交换柱 ($\varphi 0.5\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, AG50 W $\times 8(\text{H}^+)$ 100 ~ 200 目), 用 1.75 mol/L 的盐酸溶液和 2.5 mol/L 的盐酸溶液淋洗基体元素和其他元素,用 4 mol/L 的盐酸溶液淋洗轻稀土元素。蒸干。钐钕用 P507 萃淋树脂分离,蒸干后转为硝酸盐,采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计分析。质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正,标准测量结果:SHINESTU 为 0.512118 ± 3 (标准值为 0.512110)。

4 分析结果

4.1 主量元素

主量元素分析结果见表 1。

白沙冲岩体以高 SiO_2 (67.03% ~ 76.30%)、 Al_2O_3 (12.07% ~ 17.27%)、 CaO (0.78% ~ 4.12%) 和烧失量 (LOI) (3.30% ~ 6.23%) 为特征。如此高的烧失量推测与流体作用有关。 K_2O 含量介于 2.75% ~ 4.15% 之间,而 Na_2O 含量较低且变化较大 (0.06% ~ 1.19%),故具有较低的全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量 (3.28% ~ 4.97%) 和较高的、变化较大的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 (2.31 ~ 67.86)。在成分上白沙冲岩

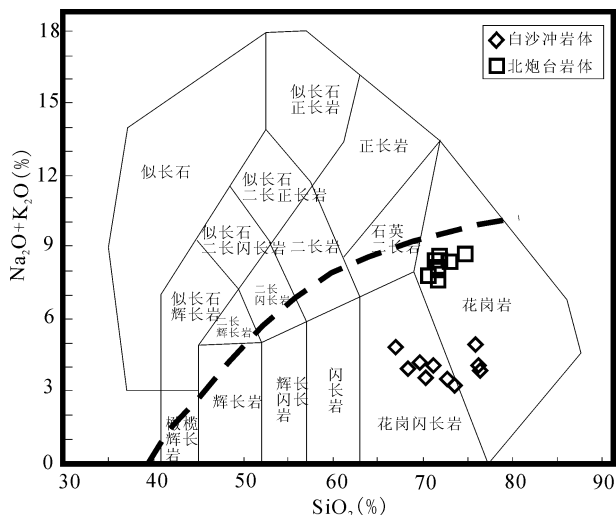


图 2 个旧矿田白沙冲及北炮台岩体 TAS 图解 (据 Cox et al., 1979; Middlemost, 1994)

Fig. 2 TAS diagram of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (after Cox et al., 1979; Middlemost, 1994)

体落入花岗闪长岩—花岗岩区域 (图 2) (Cox et al., 1979; Middlemost, 1994)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上 (图 3) (Morrison, 1980; Rickwood, 1989; Rollison, 1993)

表 2 个旧矿田白沙冲黑云母花岗岩和北炮台似斑状黑云母花岗岩 CIPW 标准矿物计算结果 (%)

Table 2 CIPW (%) data of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield

岩体	样号	石英 (Q)	钙长石 (An)	钠长石 (Ab)	正长石 (Or)	刚玉 (C)	透辉石 (Di)	紫苏辉石 (Hy)	钛铁矿 (Il)	磁铁矿 (Mt)	磷灰石 (Ap)	合计
白沙冲岩体	M100101	39.81	19.69	5.86	26.14	4.58	0.00	3.70	0.04	0.15	0.03	100.00
	M100102	50.05	21.03	0.81	21.88	3.93	0.00	2.11	0.05	0.11	0.03	100.01
	M100103	53.43	19.09	0.73	21.27	3.23	0.00	1.91	0.05	0.26	0.03	100.00
	M100104	60.62	3.95	0.49	23.38	8.64	0.00	2.78	0.05	0.06	0.03	100.01
	M100106	43.44	21.85	10.80	17.43	3.37	0.00	2.90	0.03	0.14	0.03	99.99
	M100107	52.33	7.60	0.77	24.64	10.60	0.00	3.83	0.02	0.18	0.02	99.99
	M100108	50.62	9.19	0.63	26.18	9.06	0.00	4.06	0.02	0.21	0.03	100.00
	M100109	55.81	10.44	4.75	21.76	4.06	0.00	2.84	0.06	0.24	0.03	99.99
	M100110	51.25	9.38	10.20	23.41	2.84	0.00	2.42	0.08	0.39	0.04	100.02
	M100111	54.34	20.18	0.62	20.03	2.42	0.00	2.15	0.08	0.15	0.03	100.00
	北炮台岩体	M100113	28.46	7.31	26.43	28.67	0.00	1.90	3.93	1.06	1.60	0.63
M100114		31.13	4.50	27.08	31.36	0.00	1.59	2.29	0.62	1.04	0.40	100.01
M100116		28.13	4.73	27.46	32.08	0.00	2.38	3.12	0.79	0.86	0.45	100.00
M100118		28.57	4.86	26.87	31.31	0.00	2.16	3.99	0.88	0.85	0.49	99.98
M100119		27.98	5.59	27.14	32.49	0.00	0.98	3.59	0.77	1.02	0.44	100.00
M100120		33.23	3.33	25.25	34.26	0.00	0.56	2.05	0.42	0.64	0.26	100.00
M100121		28.64	6.17	25.75	32.83	0.00	1.21	3.33	0.72	0.91	0.45	100.00
M100122		30.25	7.27	23.69	31.77	0.17	0.00	4.22	0.83	1.35	0.44	99.99
M100124		30.91	6.82	26.15	28.42	0.00	0.91	4.05	0.89	1.32	0.52	99.99
M100125		29.57	6.61	25.82	31.55	0.00	0.18	4.11	0.73	1.00	0.42	99.99

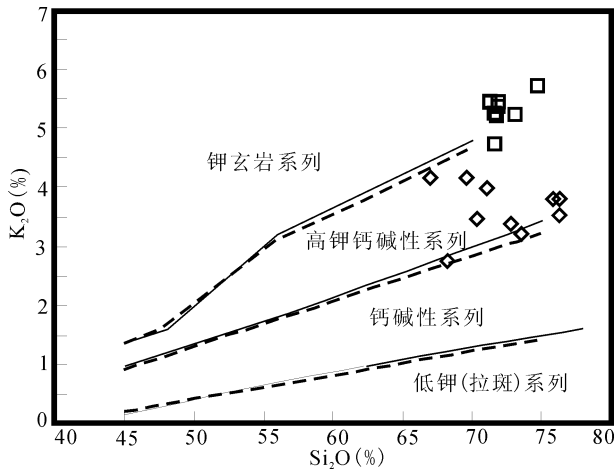


图 3 个旧矿田白沙冲及北炮台岩体 K_2O-SiO_2 岩石系列判别图(据 Morrison, 1980; Rickwood, 1989; Rollison, 1993)(图例同图 2)

Fig. 3 K_2O-SiO_2 diagram of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (after Morrison, 1980; Rickwood, 1989; Rollison, 1993) (Symbols the same to Fig. 2)

落在高钾钙碱性系列。铝饱和指数(A/CNK)介于 1.21 ~ 2.47 之间(表 1),在 A/NK—A/CNK 图解上(图 4)(Maniar et al., 1989)落在过铝质区域。显示白沙冲岩体为过铝质高钾钙碱性花岗质岩石类。白沙冲岩体其他主要元素如 MgO (0.53% ~ 1.38%)、 TFe_2O_3 (全铁含量) (0.24% ~ 0.74%)、 MnO (0.01% ~ 0.03%)、 TiO_2 (0.01% ~ 0.04%) 和 P_2O_5 (0.01% ~ 0.02%) 等均较低。CIPW 标准矿物计算结果(表 2)显示,白沙冲岩体所有样品均出现刚玉。

北炮台岩体具有高 SiO_2 (70.64% ~ 74.68%)、 Al_2O_3 (12.26% ~ 13.16%) 的特征。与白沙冲岩体之不同,北炮台岩体具有较高的 TFe_2O_3 (1.66% ~ 3.65%)、 Na_2O (2.77% ~ 3.21%)、 K_2O (4.73% ~ 5.73%)、全碱 ($Na_2O + K_2O$) 含量 (7.77% ~ 8.68%)、 MnO (0.04% ~ 0.07%)、 TiO_2 (0.22% ~ 0.55%)、 P_2O_5 (0.11% ~ 0.27%) 和较低的 MgO (0.38% ~ 0.92%)、 CaO (0.94% ~ 2.27%)、 K_2O/Na_2O 值 (1.55 ~ 1.94)、铝饱和指数(A/CNK) (0.90 ~ 0.98)。北炮台岩体在成分上属于花岗岩(图 2)(Cox et al., 1979; Middlemost, 1994),在 K_2O-SiO_2 图解上(图 3)(Morrison, 1980; Rickwood, 1989; Rollison, 1993)落在钾玄岩系列或者钾玄岩系列与高钾钙碱性系列的边界附近,在 A/NK—A/CNK 图解上(图 4)(Maniar et al., 1989)落在准铝质区域。

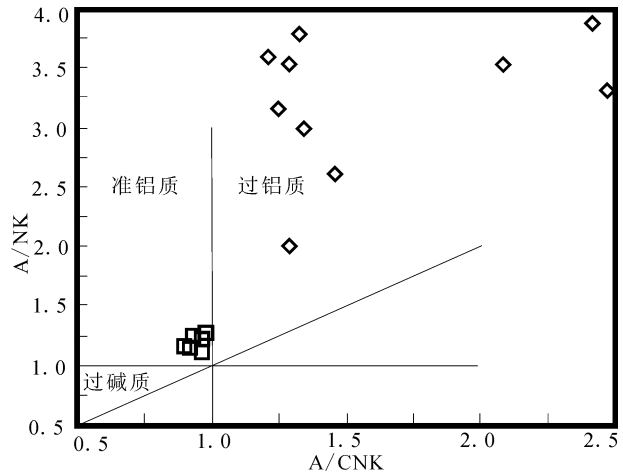


图 4 个旧矿田白沙冲及北炮台岩体岩石铝饱和指数判别图解(据 Maniar et al., 1989)(图例同 2)

Fig. 4 A/NK—A/CNK diagram of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (after Maniar et al., 1989) (Symbols the same to Fig. 2)

CIPW 标准矿物计算结果(表 2)显示,北炮台岩体除一个样品(M100122)出现少量(0.17%)刚玉外,其余均不出现刚玉。

4.2 微量元素和稀土元素

微量元素和稀土元素分析结果见表 3。

白沙冲岩体大离子亲石元素(LILE)Rb、Sr 含量分别为 404 ~ 562 $\mu g/g$ 、10.70 ~ 74.60 $\mu g/g$, Rb/Sr 值为 6.23 ~ 40.65。高场强元素(HFSE)Nb、Ta 含量分别为 53.70 ~ 69.30 $\mu g/g$ 、8.98 ~ 25.10 $\mu g/g$, Nb/Ta 值为 2.27 ~ 6.08。

与白沙冲岩体相比,北炮台岩体具有较低的 Rb 含量 (315 ~ 438 $\mu g/g$) 和较高的 Sr 含量 (105 ~ 258 $\mu g/g$), Rb/Sr 值较小 (1.51 ~ 4.17); Nb、Ta 含量均较低,分别为 28.10 ~ 37.30 $\mu g/g$ 、2.53 ~ 4.85 $\mu g/g$, Nb/Ta 值较高 (6.35 ~ 12.02)。

在原始地幔标准化图解(Sun et al., 1989)上(图 5),两个岩体均亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 及高场强元素 Nb、P、Eu、Ti。北炮台岩体亏损 Nb、Ta, 具有陆壳岩石特征。

白沙冲岩体稀土总量(ΣREE)为 106.08 ~ 148.51 $\mu g/g$ 。轻稀土元素(LREE)与重稀土元素含量比值(LREE/HREE)为 2.34 ~ 4.35, $(La/Yb)_N$ 为 1.35 ~ 2.44, 显示轻、重稀土元素分馏作用不明显,略微富集轻稀土元素。 $(La/Sm)_N$ 为 1.86 ~ 2.61, $(Gd/Yb)_N$ 为 0.47 ~ 0.71, 表明 LREE 分馏相对明显,而 HREE 分馏不显著。

表3 白沙冲黑云母花岗岩和北炮台似斑状黑云母花岗岩微量、稀土元素含量($\mu\text{g/g}$)及特征参数
Table 3 Trace elements and REE contents ($\mu\text{g/g}$) in the Baishachong and Beipaotai granites

岩体	样号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Nb	Mo	Cd	In	Sb
白沙冲岩体	M100101	45.60	11.20	4.69	3.44	0.87	0.26	5.06	5.16	138.00	28.60	523.00	38.50	72.30	59.80	4.86	0.23	0.15	1.73
	M100102	13.80	53.10	3.61	6.28	0.98	0.28	1.30	32.70	14.70	21.80	465.00	58.80	53.80	63.20	3.33	0.16	0.05	6.47
	M100103	121.00	54.20	3.60	3.33	1.21	0.25	5.31	1.32	15.80	25.00	562.00	74.60	61.00	64.20	2.15	0.03	0.04	0.75
	M100104	60.30	6.49	3.52	14.50	0.76	0.10	2.90	5.99	7.26	25.90	435.00	10.70	64.80	53.70	1.52	0.05	0.06	2.67
	M100106	147.00	50.40	3.24	3.83	1.68	0.15	4.03	1.23	50.70	25.10	490.00	61.30	61.90	57.40	0.83	0.03	0.04	0.58
	M100107	159.00	10.40	4.41	4.19	1.03	0.32	5.01	2.10	55.60	29.00	545.00	21.00	37.90	58.30	4.73	0.09	0.19	2.39
	M100108	62.70	9.64	5.93	5.13	1.28	0.32	8.18	3.25	195.00	33.90	530.00	19.80	67.70	56.90	6.53	0.33	0.28	1.78
	M100109	26.70	69.70	3.31	7.00	1.74	0.32	6.05	8.75	677.00	20.90	466.00	47.70	59.70	67.70	1.44	0.64	0.05	0.77
	M100110	22.20	27.20	3.40	5.18	0.68	0.35	3.42	8.75	136.00	20.30	483.00	57.20	54.10	54.60	1.67	0.08	0.06	1.08
	M100111	19.80	12.50	3.07	4.78	2.37	0.27	2.27	1.28	19.30	20.30	404.00	64.80	59.00	69.30	0.33	0.04	0.03	0.70
	M100113	60.30	15.50	6.61	33.50	5.88	5.91	6.89	3.03	60.50	24.60	390.00	258.00	29.90	37.30	3.15	0.11	0.06	0.14
M100114	52.70	12.70	4.45	18.50	3.98	2.99	2.01	1.96	33.30	20.50	406.00	226.00	29.60	29.70	1.48	0.05	0.03	0.09	
M100116	110.00	11.60	5.91	22.40	5.86	4.40	3.93	2.63	49.70	22.10	374.00	228.00	31.00	32.10	1.95	0.06	0.04	0.03	
M100118	111.00	11.80	5.37	24.10	6.03	4.55	7.08	3.04	57.70	20.40	351.00	214.00	27.90	28.50	1.94	0.05	0.05	0.06	
M100119	99.30	12.80	5.82	26.80	4.63	4.14	2.95	2.81	64.10	22.40	371.00	201.00	34.00	33.10	0.90	0.08	0.05	0.11	
M100120	45.20	19.00	3.74	13.30	2.41	2.26	4.98	4.78	31.90	20.60	438.00	105.00	29.20	30.80	0.19	0.06	0.03	0.72	
M100121	77.80	11.70	4.87	21.10	3.34	3.95	2.69	3.42	42.60	21.30	358.00	223.00	26.20	28.40	0.17	0.07	0.03	0.05	
M100122	57.50	10.80	3.85	21.70	4.10	4.40	3.91	8.45	50.60	20.40	315.00	181.00	24.90	30.40	0.44	0.13	0.03	1.33	
M100124	85.20	16.10	5.45	25.90	4.07	4.42	0.98	2.78	53.00	22.10	358.00	201.00	32.90	34.00	1.52	0.05	0.07	0.67	
M100125	83.80	10.90	4.96	24.30	3.71	4.27	4.10	7.96	100.00	20.70	348.00	205.00	25.40	28.10	1.55	0.05	0.04	0.58	
岩体	样号	Ca	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	W
白沙冲岩体	M100101	37.50	25.20	22.10	49.60	6.10	23.90	7.03	0.04	6.19	1.52	8.95	1.82	6.12	1.21	10.20	1.60	19.90	4.28
	M100102	24.00	20.00	18.10	34.90	4.10	15.90	4.78	0.06	4.82	1.15	6.96	1.36	4.80	0.92	7.18	1.05	16.60	6.40
	M100103	47.60	18.50	19.40	41.20	4.74	18.40	5.28	0.06	5.20	1.26	7.63	1.49	4.84	0.95	7.18	1.08	16.40	16.50
	M100104	29.90	18.60	17.60	36.40	4.33	17.60	5.24	0.05	5.45	1.37	7.98	1.62	5.46	1.10	8.35	1.36	14.90	5.76
	M100106	42.30	23.00	16.40	37.00	4.62	17.70	5.54	0.03	5.14	1.27	7.48	1.41	4.89	1.02	8.21	1.37	16.90	36.10
	M100107	88.20	27.40	21.50	45.80	5.39	19.70	5.18	0.02	4.41	0.93	5.16	0.98	3.37	0.70	5.94	0.95	17.60	4.51
	M100108	45.70	24.50	23.50	54.30	6.29	23.90	6.43	0.02	5.76	1.36	7.53	1.58	5.38	1.18	9.80	1.48	25.10	3.55
	M100109	25.10	63.40	16.40	35.80	4.00	16.20	5.09	0.09	5.66	1.34	8.65	1.66	1.66	1.01	7.97	1.25	11.50	5.89
	M100110	24.20	82.90	23.30	46.50	5.29	20.20	5.71	0.13	5.62	1.33	7.77	1.47	4.84	0.91	6.92	1.04	8.98	7.06
	M100111	29.30	13.70	18.00	36.40	4.51	18.30	5.63	0.10	5.89	1.41	8.64	1.71	5.68	1.00	6.72	1.09	12.40	15.50

(续表 3)

岩体	样号	Ca	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Th	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	La	Ta	W	
北炮台岩体	M100113	32.90	539.00	88.00	154.00	16.90	62.10	9.23	1.10	7.92	1.20	5.65	0.97	2.89	0.44	2.91	0.45	3.96	10.30	
	M100114	48.90	314.00	67.10	120.00	13.50	50.00	8.68	0.77	6.99	1.11	5.65	0.96	2.90	0.45	3.00	0.42	3.20	4.11	
	M100116	19.90	533.00	72.30	130.00	14.40	53.50	9.03	1.11	7.78	1.27	5.82	0.95	2.85	0.42	2.88	0.38	2.94	11.90	
	M100118	21.30	513.00	76.40	138.00	15.40	54.50	8.92	1.09	7.19	1.10	5.36	0.90	2.71	0.38	2.65	0.36	2.53	15.00	
	M100119	35.40	452.00	84.20	149.00	16.60	61.30	10.50	1.06	8.31	1.35	6.47	1.12	3.29	0.51	3.34	0.51	3.63	10.00	
	M100120	36.60	185.00	44.80	85.90	9.44	35.80	6.65	0.45	5.75	1.03	5.10	0.85	2.73	0.46	2.99	0.45	4.85	11.30	
	M100121	20.80	539.00	66.10	115.00	13.00	47.30	7.87	1.14	6.31	1.01	5.10	0.88	2.54	0.37	2.48	0.35	2.62	4.79	
	M100122	18.30	464.00	81.70	145.00	16.40	59.90	9.21	1.04	7.55	1.11	5.27	0.88	2.45	0.37	2.38	0.35	2.53	39.10	
	M100124	34.40	407.00	80.20	142.00	15.70	59.70	9.84	1.00	7.84	1.26	6.22	1.09	3.27	0.50	3.39	0.51	3.96	11.20	
	M100125	19.70	483.00	70.90	122.00	13.70	49.00	8.00	1.10	6.49	1.04	5.16	0.83	2.56	0.39	2.71	0.40	2.96	3.24	
	岩体	样号	Re	Tl	Pb	Bi	Th	U	Zr	Hf	ΣREE	LREE	HREE	$\frac{LREE}{HREE}$	$(\frac{La}{Yb})_N$	$(\frac{La}{Sm})_N$	$(\frac{Gd}{Yb})_N$	δEu	Nb/Ta	Rb/Sr
	白沙冲岩体	M100101	0.02	3.55	101.00	15.80	21.10	17.90	175.00	10.20	146.38	108.77	37.61	2.89	1.46	1.98	0.49	0.02	3.01	13.58
M100102		0.02	2.62	99.00	7.43	22.30	23.80	149.00	8.07	106.08	77.84	28.24	2.76	1.70	2.38	0.54	0.04	3.81	7.91	
M100103		0.00	3.25	74.50	0.46	19.20	23.00	172.00	8.06	118.70	89.08	29.63	3.01	1.82	2.31	0.58	0.03	3.91	7.53	
M100104		0.00	3.42	108.00	0.65	20.50	20.20	197.00	10.50	113.91	81.22	32.69	2.48	1.42	2.11	0.53	0.03	3.60	40.65	
M100106		0.00	2.28	75.40	5.49	15.80	21.10	196.00	11.10	112.08	81.29	30.79	2.64	1.35	1.86	0.51	0.02	3.40	7.99	
M100107		0.02	3.05	100.00	16.10	17.40	12.10	190.00	12.40	120.02	97.59	22.43	4.35	2.44	2.61	0.60	0.01	3.31	25.95	
M100108		0.02	3.86	95.60	19.20	19.40	18.70	172.00	11.90	148.51	114.44	34.07	3.36	1.62	2.30	0.47	0.01	2.27	26.77	
M100109		0.00	2.98	159.00	0.54	21.30	27.20	133.00	6.00	110.67	77.58	33.09	2.34	1.39	2.03	0.57	0.05	5.89	9.77	
M100110		0.00	3.29	97.60	0.36	24.00	25.30	174.00	7.24	131.03	101.13	29.90	3.38	2.27	2.57	0.66	0.07	6.08	8.44	
M100111		0.00	2.35	77.80	0.18	22.90	30.50	189.00	7.51	115.08	82.94	32.14	2.58	1.81	2.01	0.71	0.05	5.59	6.23	
M100113		0.00	2.15	41.90	0.74	44.40	15.30	307.00	8.26	353.76	331.33	22.43	14.77	20.39	6.00	2.20	0.38	9.42	1.51	
M100114	0.00	2.22	59.80	0.29	38.60	17.60	256.00	6.66	281.51	260.05	21.47	12.11	15.08	4.86	1.88	0.29	9.28	1.80		
M100116	0.00	1.91	49.40	0.23	46.90	14.60	288.00	7.13	302.69	280.34	22.35	12.54	16.93	5.04	2.18	0.40	10.92	1.64		
M100118	0.00	1.78	47.30	0.32	45.70	12.80	276.00	6.98	314.96	294.31	20.65	14.25	19.44	5.39	2.19	0.40	11.26	1.64		
M100119	0.00	2.08	57.30	0.25	50.90	17.40	321.00	8.07	347.56	322.66	24.90	12.96	17.00	5.04	2.01	0.34	9.12	1.85		
M100120	0.00	2.21	61.90	3.12	38.70	7.65	185.00	5.68	202.67	183.04	19.63	9.32	10.10	4.24	1.55	0.22	6.35	4.17		
M100121	0.00	1.79	49.80	0.14	47.60	8.15	188.00	5.06	269.42	250.41	19.01	13.18	17.97	5.28	2.05	0.48	10.84	1.61		
M100122	0.00	1.60	44.10	0.21	36.50	8.94	231.00	7.06	333.60	313.25	20.35	15.39	23.14	5.58	2.56	0.37	12.02	1.74		
M100124	-	1.98	58.00	0.58	45.60	16.00	233.00	5.99	332.51	308.44	24.07	12.81	15.95	5.13	1.87	0.34	8.59	1.78		
M100125	0.00	1.92	54.10	0.11	41.90	13.80	268.00	6.53	284.28	264.70	19.58	13.52	17.64	5.57	1.93	0.45	9.49	1.70		

注: 其中“-”表示未检出。

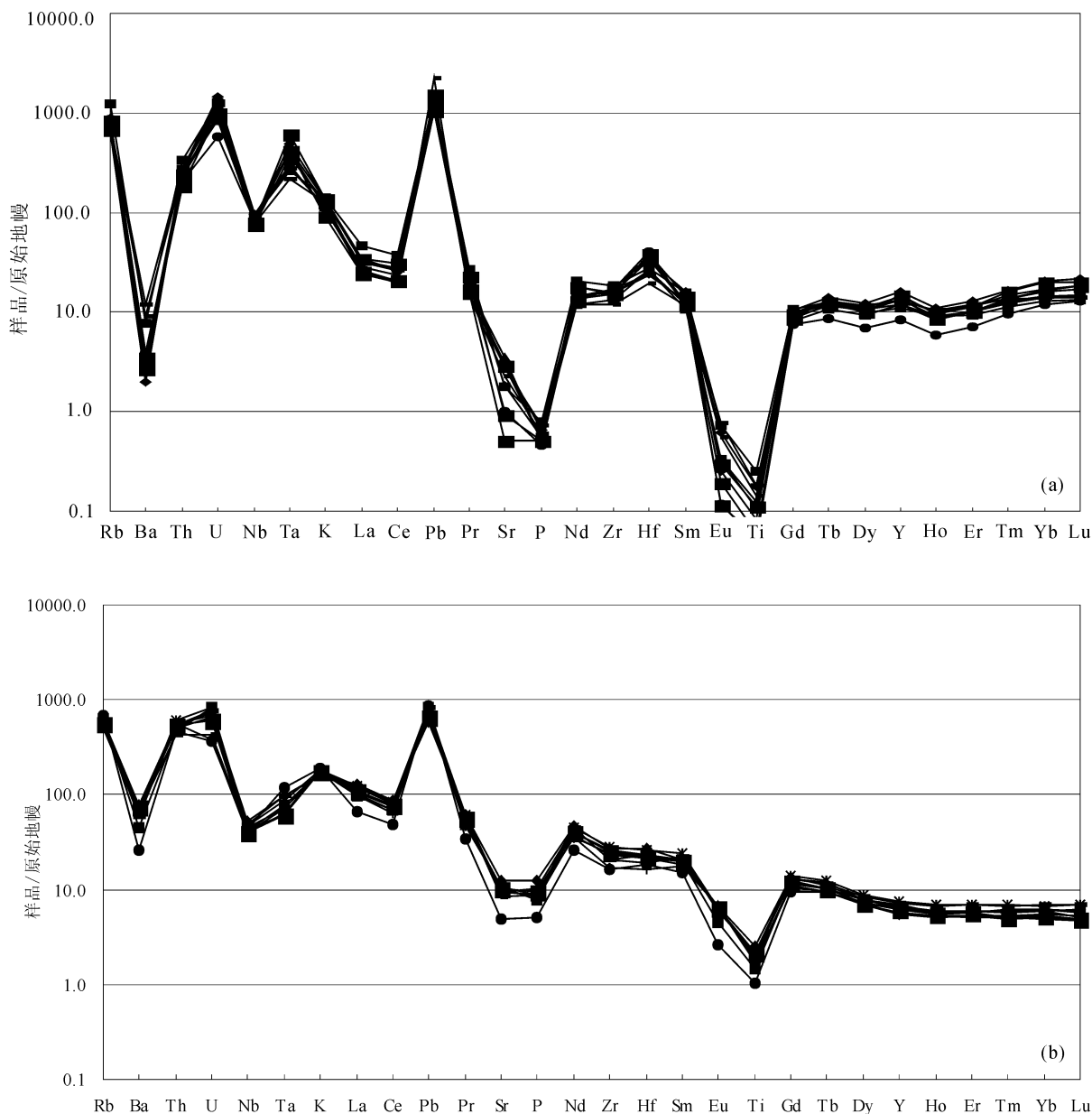


图5 个旧矿田白沙冲岩体(a)及北炮台岩体(b)微量元素原始地幔标准化图解(据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element patterns of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (after Sun et al., 1989)

与白沙冲岩体相比,北炮台岩体稀土总量(ΣREE)较高(202.67 ~ 353.76 $\mu\text{g/g}$), LREE/HREE 值为 9.32 ~ 15.39, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 10.10 ~ 23.14, 显示轻稀土元素富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 4.24 ~ 6.00, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.55 ~ 2.56, 表明轻稀土元素和重稀土元素均发生分馏,且轻稀土元素分馏更显著。

在稀土元素球粒陨石标准化图解(图6)(Boynton, 1984)上,白沙冲岩体呈“V”型,显示强烈的铕负异常(δEu 为 0.01 ~ 0.07),具 M 型的四分组

效应特征(赵振华等, 1992, 1999);北炮台岩体呈右倾型,铕负异常不明显(δEu 为 0.22 ~ 0.48)。

4.3 Nd、Sr 同位素

Nd、Sr 同位素分析结果见表4。白沙冲岩体有些样品的 $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 比值很高,甚至大于 70,并且白沙冲岩体的绢云母化比较明显,而 Rb—Sr 同位素体系的活动性较大,易受后期地质作用影响。考虑到这些因素及一些不合理现象(有些样品的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]$ 值低于球粒陨石值(表4)),用

表 4 白沙冲黑云母花岗岩和北炮台似斑状黑云母花岗岩 Nd—Sr 同位素特征
Table 4 Nd—Sr isotopic data of Baishachong and Beiposhtai granites

岩体	样号	$\frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$\left[\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})} \right]_i$	$\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})}$	$\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	T_{DM} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_i$
白沙冲岩体	M100101	39.3123	0.748044 ± 0.000016	0.7048	0.1778	0.512186 ± 0.000008	-8.6321	4067.0355	1583.6452	0.512096
	M100102	22.8857	0.725703 ± 0.000012	0.7005	0.1817	0.51218 ± 0.000017	-8.7877	4584.8319	1596.2682	0.512088
	M100107	75.1043	0.775194 ± 0.000009	0.6926	0.159	0.512169 ± 0.000009	-8.7781	2725.6155	1595.4870	0.512088
	M100108	77.4637	0.78907 ± 0.000010	0.7039	0.1627	0.51216 ± 0.000013	-8.9903	2948.3855	1612.6967	0.512078
	M100109	28.2719	0.71688 ± 0.000010	0.6858	0.19	0.512184 ± 0.000008	-8.7917	6140.2702	1596.5887	0.512088
北炮台岩体	M100113	4.3745	0.730203 ± 0.000010	0.7251	0.0899	0.512099 ± 0.000010	-9.3877	1294.8757	1649.3253	0.512050
	M100114	5.1988	0.717343 ± 0.000009	0.7112	0.105	0.51221 ± 0.000015	-7.3621	1317.7939	1484.9646	0.512154
	M100120	12.0718	0.72683 ± 0.000012	0.7126	0.1123	0.512031 ± 0.000014	-10.9512	1681.2836	1776.0649	0.511970
	M100121	4.6459	0.717562 ± 0.000009	0.7121	0.1006	0.512122 ± 0.000009	-9.0521	1386.0831	1622.1012	0.512068
	M100124	5.1544	0.718271 ± 0.000008	0.7122	0.0996	0.512164 ± 0.000012	-8.222	1318.1392	1554.7621	0.512110

注:① 其中白沙冲和北炮台岩体模式年龄的计算分别采用文献(程德博等,2009)中 77.4 ± 2.5 Ma 和 82.8 ± 1.7 Ma 的年龄值。② $\left[\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})} \right]_i = \left[\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})} \right]_{\text{岩体}} + \frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})} \cdot (e^{\lambda_{\text{Rb}} t} - 1)$, Rb 的衰

变常数 $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; ③ $\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_i = \left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{岩体}} + \left[\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{岩体}} \cdot (e^{\lambda_{\text{Sm}} t} - 1)$; ④ $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{岩体}}}{\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{地壳}}} - 1 \right\} \cdot 10000$; ⑤ $\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{地壳}}(t) = 0.512638 - 0.1967$

$\cdot (e^{\lambda_{\text{Sm}} t} - 1)$; ⑥ $T_{\text{DM}} = \frac{1}{\lambda_{\text{Sm}}} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{岩体}} - 0.51315}{\left[\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_{\text{岩体}} - 0.2137} \right\}$; ⑦ Sm 的衰变常数 $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$; ⑧ T_{DM2} 为二阶段模式年龄。

Rb—Sr 同位素体系来讨论物质来源是不合适的(Wu et al., 2002)。Sm—Nd 同位素体系活动性较小,示踪效果明显优于 Rb—Sr 同位素体系,因此我们选用 Sm—Nd 同位素体系来示踪白沙冲和北炮台岩体的物质来源。

白沙冲岩体的 $\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_i$ 值为 0.512078 ~ 0.512096, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -8.63 ~ -8.99;北炮台岩体的 $\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \right]_i$ 值为 0.511970 ~ 0.512154, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -7.36 ~ -10.95。在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)-t$ 图解(图 7)(周新民等,2007)上,两个岩体均落于华南元古宙地壳演化域内。白沙冲岩体的 Nd 同位素二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1.58 ~ 1.61 Ga,北炮台岩体为 1.48 ~ 1.78 Ga。

5 讨论

5.1 白沙冲与北炮台花岗岩源区及演化

在岩浆结晶分异过程中,元素组成将发生规律性的变化。由表 3 可知,白沙冲岩体的 Nb/Ta 平均值为 4.09,北炮台为 9.73,均小于地壳的 Nb/Ta 值(约为 11,李志国^①;裴先治等,2009),显示两者均来自于陆壳。白沙冲和北炮台岩体均亏损 Ba、Sr、Nb、P、Ti, Ba、Sr 的亏损可能与斜长石和钾长石的分离结晶有关(朱弟成等,2009)。P 的亏损可能与磷灰石的分离结晶有关, Ti 的亏损可能与钛铁矿的分离结晶有关。如图 8 所示,显示了两个岩体发生了斜长石和钾长石的分离结晶。如图 9 所示,显示了褐帘石和磷灰石的分离结晶。

在花岗质岩浆结晶分异过

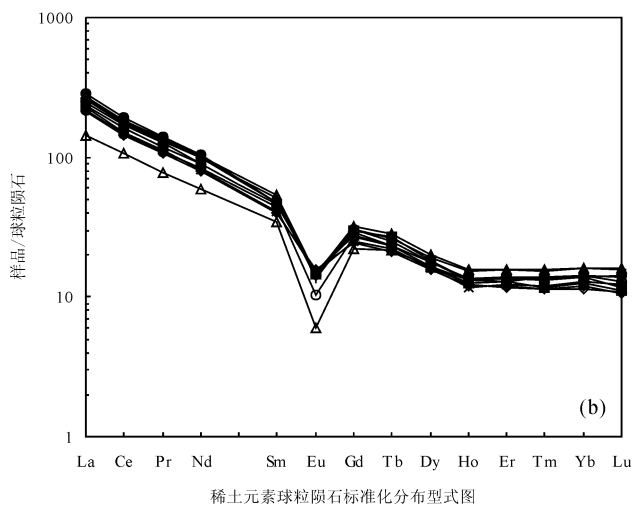
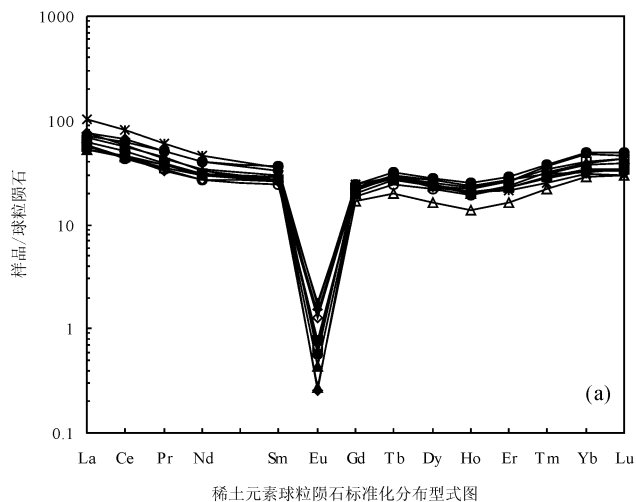


图6 个旧矿田白沙冲岩体(a)及北炮台岩体(b)稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (据 Boynton, 1984)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (after Boynton, 1984)

程中, Nb 趋向亏损而 Ta 相对富集, Rb 相对富集而 Sr 相对亏损 (赵振华, 1997), 白沙冲岩体的 Nb/Ta 值(2.27 ~ 6.08) 小于北炮台岩体(6.35 ~ 12.02), 而 Rb/Sr 值(6.23 ~ 40.65) 大于北炮台岩体(1.51 ~ 4.17), 表明白沙冲岩体的演化程度较高。(La/Yb)_N 和 δEu 也常作为岩浆演化程度的指标, 在中酸性和酸性岩浆体系中, 随分异作用增强, (La/Yb)_N 值减小, Eu 亏损愈加明显 (赵振华, 1997)。白沙冲岩体 (La/Yb)_N 值(1.35 ~ 2.44) 和 δEu 值(0.01 ~ 0.07) 均小于北炮台岩体 ((La/Yb)_N = 10.10 ~ 23.14, δEu = 0.22 ~ 0.48), 反映了白沙冲岩体的分异演化程度高于北炮台岩体。

白沙冲岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -8.63 ~ -8.99, 北

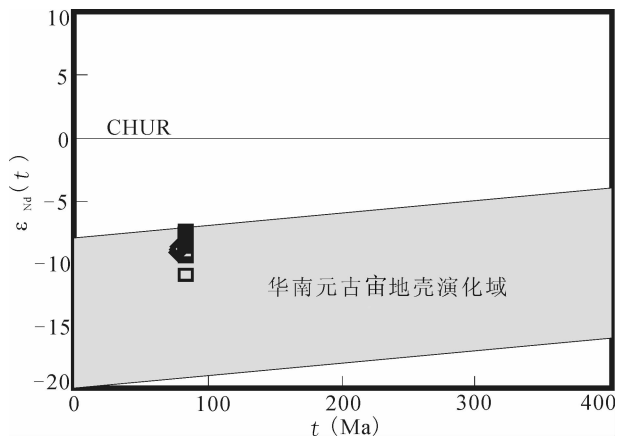


图7 个旧矿田白沙冲及北炮台岩体 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图 (据周新民等, 2007) (图例同图2)

Fig. 7 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ diagram of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (after Zhou Xinmin et al., 2007) (Symbols the same to Fig. 2)

炮台岩体为 -7.36 ~ -10.95, 显示出壳源物质特征 (图7), 后者的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围更宽, 反映了更加复杂的源区物质组成。在图7上, 两者均落入华南元古宙地壳演化域, 结合两者的 T_{DM2} 分别为 1.58 ~ 1.61 Ga 和 1.48 ~ 1.78 Ga, 认为它们的源区可能是古老的古—中元古界陆壳物质。在 Rb/Ba—Rb/Sr 图解 (图10) (Sylvester, 1998) 中, 白沙冲岩体落入右上方的富粘土区内, 而北炮台岩体落入富粘土区与贫粘土区的分界线附近, 显示两者的物源稍有区别。

需要注意的是, 白沙冲岩体的斜长石普遍绢云母化, 其地球化学成分亦很特殊, Na₂O 含量非常低, 仅为 0.06% ~ 1.19%, 远低于花岗岩平均值 (黎彤等, 1998), 并且烧失量也较高, 在 TAS 图解上属花岗闪长岩, 但强烈的 Eu 亏损, 微弱的轻重稀土分异, 高 Nb、Ta 含量均与花岗闪长岩不符。考虑到它的稀土元素具有 M 型的四分组效应特征, 而且整体分异演化程度较高, 我们认为这可能反映了熔体—流体的相互作用 (赵振华等, 1999, 2010)。

研究表明, 矿区内其他花岗岩体的全岩 [$n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$]_i 为 0.512053 ~ 0.512176, 而 $\epsilon_{Nd}(t)$ (-6.93 ~ -9.27) 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ (-0.4 ~ 1.2) 均主要表现为负值 (Cheng et al., 2010), 对应于中—新元古代地壳模式年龄, 并且显示出高钾富碱、弱过铝—强过铝、亏损 Ba、Nb、Eu、P、Ti、富集 Rb、U 的特点。地球化学数据显示, 这些花岗岩体在演化过程中经历了较高程度的诸如斜长石、钾长石、钛铁矿、榍石等矿物的结晶分异 (Cheng et al., 2010)。从本

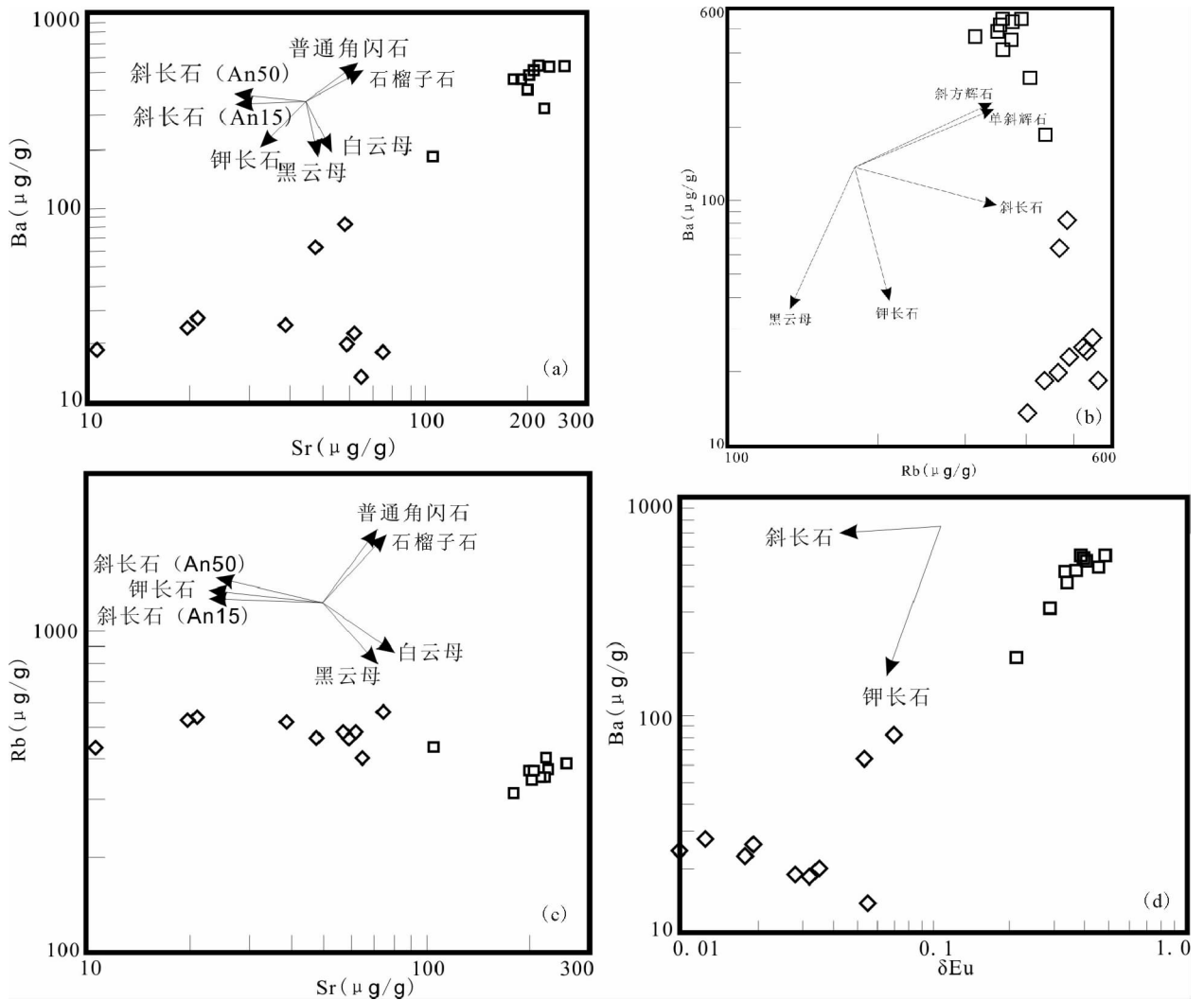


图 8 个旧矿田白沙冲及北炮台岩体 Ba—Sr(a)、Ba—Rb(b)、Rb—Sr(c)、Ba— δ Eu(d)图解(图例同图 2)

Fig. 8 Ba—Sr(a)、Ba—Rb(b)、Rb—Sr(c) and Ba— δ Eu(d) diagrams of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (Symbols the same to Fig. 2)

文获得的数据可以看出,白沙冲和北炮台岩体与区内其他花岗岩体极为相似。结合矿区内晚白垩世花岗质岩浆活动大约发生在 76 ~ 85 Ma(程彦博等, 2009),相距不到 10 Ma,我们认为矿区内花岗岩体具有相同的源区及成因,区别可能在于演化程度不同。

5.2 中国西南部晚白垩世花岗岩成岩事件及构造环境

晚白垩世是滇东南—桂西一带重要的岩浆活动期,岩浆岩规模极为宏大:在个旧,不但形成了花岗岩(76 ~ 85 Ma)(程彦博等,2008a,2009),而且形成碱性岩(76.6 ± 3.6 Ma)和煌斑岩(77.2 ± 2.4 Ma)(程彦博等,2008b);在都龙,形成老君山花岗岩(92.9 ± 1.9 Ma)(刘玉平等,2007);在文山,形成薄

竹山花岗岩(86 ~ 88 Ma)(程彦博等,2010);在广西大厂,形成龙箱盖花岗岩((91 ± 1) ~ (93 ± 1) Ma)(蔡明海等,2006);在广西宾阳,形成昆仑关花岗岩(93 ± 1 Ma)(谭俊等,2008);程彦博等(2009)研究表明,白沙冲和北炮台岩体分别形成于(77.4 ± 2.5) Ma、(82.8 ± 1.7) Ma,反映了白沙冲和北炮台岩体的形成亦是这次岩浆活动—成岩事件的一部分。

程彦博等(2008a)在研究个旧矿区内的老卡岩体后指出,个旧花岗岩主要形成于后碰撞造山向板内环境的地壳伸展转换阶段;同时对个旧矿区出现的碱性岩及煌斑岩的研究也反映了当时岩石圈伸展的构造背景(程彦博等,2008b)。同样,老君山花岗岩、薄竹山花岗岩、龙箱盖花岗岩和昆仑关花岗岩无

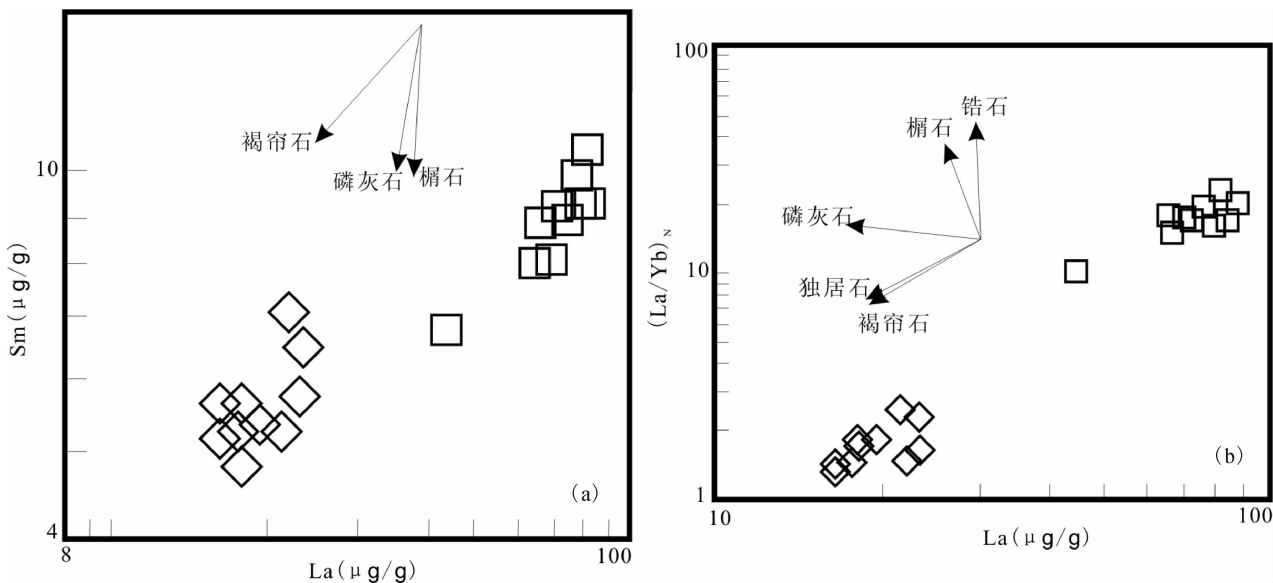


图9 个旧矿田白沙冲及北炮台岩体 Sm—La(a)、(La/Yb)_N - La(b)图(图例同图2)
 Fig. 9 Sm—La (a) and (La/Yb)_N - La(b) diagrams of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (Symbols the same to Fig. 2)

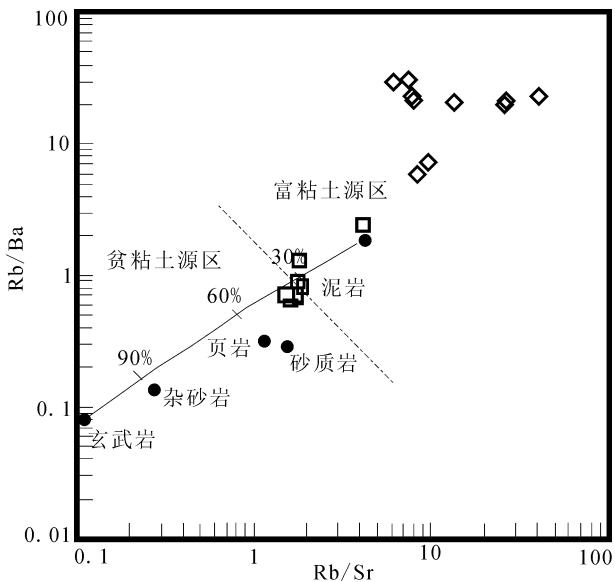


图10 个旧矿田白沙冲及北炮台岩体 Rb/Ba—Rb/Sr 图
 (据 Sylvester, 1998) (图例同图2)
 Fig. 10 Rb/Ba—Rb/Sr diagram of the Baishachong and Beipaotai granites in the Gejiu orefield (after Sylvester, 1998) (Symbols the same to Fig. 2)

一例外地显示出伸展的构造环境(蔡明海等, 2004, 2006; 刘玉平等, 2007; 谭俊等, 2008; 谢洪晶等, 2009; 程彦博等, 2010)。

在个旧花岗岩、老君山花岗岩、薄竹山花岗岩附

近分别发育了蒙自、文山和马关三个断陷盆地, 并且在个旧, 还出现了双峰式火成岩组合(毛景文等, 2008), 暗示了当时岩石圈处于伸展状态; 区域内南温河变质核杂岩的发现进一步指示了区域伸展的构造背景, 因为变质核杂岩一般被认为是岩石圈水平伸展作用结果(张世涛等, 1998; 楼法生等, 2005)。滇东南—桂西一带的花岗岩很可能就是华南西部晚白垩世大规模岩石圈拉张伸展背景下岩浆活动的结果。

6 结论

通过对白沙冲、北炮台岩体进行系统的岩石学、元素地球化学、Nd、Sr 同位素的研究, 得出如下主要结论:

(1) 白沙冲岩体、北炮台岩体的源区可能是古老的古—中元古界陆壳物质, 在岩浆演化过程中均经历了结晶分异作用, 且白沙冲岩体的分异演化程度高于北炮台岩体。

(2) 个旧花岗岩、老君山花岗岩、薄竹山花岗岩、龙箱盖花岗岩、昆仑关花岗岩等同时代花岗岩的相关资料表明, 滇东南—桂西一带在晚白垩世存在大规模的岩浆活动, 可能为晚中生代华南岩石圈伸展背景下的产物。

致谢: 在野外工作期间, 得到了云锡集团的童祥高级工程师、莫国培高级工程师、武俊德高级工程师

以及马拉格矿田各级领导的大力帮助;在数据测试期间,核工业北京地质研究院分析测试研究中心实验室的刘牧老师给予了很多帮助指导;在工作中与郭春丽博士进行了深入讨论,获益匪浅;审稿专家和章雨旭研究员提出十分中肯的修改意见,在此一致表示深深的感谢!

注 释 / Note

① 李志国. 2007. 西藏措麦林子宗群年波组火山岩地球化学及其意义. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 23~49.

参 考 文 献 / References

- 蔡明海,梁婷,吴德成,黄惠民. 2004. 广西大厂矿田花岗岩地球化学特征及其构造意义. 地质科技情报, 23(2): 57~62.
- 蔡明海,何龙清,刘国庆,吴德成,黄惠民. 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义. 地质论评, 52(3): 409~414.
- 陈吉琛,施琳,谢蕴宏. 1983. 云南 S 型和 I 型两类花岗岩划分对比的初步探讨. 云南地质, 2(1): 28~37.
- 程彦博,毛景文,谢桂青,陈懋弘,赵财胜,杨宗喜,赵海杰,李向前. 2008a. 云南个旧老厂一卡房花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束. 地质学报, 82(11): 1478~1493.
- 程彦博,毛景文,陈懋弘,杨宗喜,冯佳睿,赵海杰. 2008b. 云南个旧锡矿田碱性岩和煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 35(6): 1138~1149.
- 程彦博,毛景文,谢桂青,陈懋弘,杨宗喜. 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义. 矿床地质, 28(3): 297~312.
- 程彦博,毛景文,陈小林,李伟. 2010. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 869~878.
- 戴福盛. 1996. 个旧矿区壳源重熔岩浆岩石系列特征、演化及成岩成矿作用. 云南地质, 15(4): 330~344.
- 邓玉书. 1951. 云南个旧锡矿和构造的关系. 地质论评, 16(2): 57~66.
- 关容生. 1991. 滇东南构造岩浆带花岗岩体的含矿性探讨. 矿物岩石, 11(1): 92~101.
- 黎彤,袁怀雨,吴胜昔. 1998. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比如研究. 大地构造与成矿学, 22(1): 29~34.
- 黎应书,秦德先,党玉涛,薛传东,谈树成,洪托. 2006. 云南个旧锡矿的玄武岩成矿. 吉林大学学报(地球科学版), 36(3): 326~335.
- 黎应书,秦德先,陈爱兵,洪托,周年胜. 2007. 个旧含锡花岗岩的幔源成因证据. 有色金属(矿山部分), 59(3): 20~26.
- 李家和. 1985. 个旧花岗岩特征及成因研究. 云南地质, 4(4): 327~352.
- 李志群. 1992. 个旧复式侵入岩体成岩系列研究. 云南地质, 11(1): 15~20.
- 刘玉平,李正祥,李惠民,郭利果,徐伟,叶霖,李朝阳,皮道会. 2007. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩一成矿事件. 岩石学报, 23(5): 967~976.
- 楼法生,舒良树,王德滋. 2005. 变质核杂岩研究进展. 高校地质学报, 11(1): 67~76.
- 路红记. 2008. 个旧东区基性火山岩型铜矿床地质特征和成因探讨. 有色金属(矿山部分), 60(1): 21~24.
- 毛景文,程彦博,郭春丽,杨宗喜,冯佳睿. 2008. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论. 地质学报, 82(11): 1455~1467.
- 莫国培. 2006. 个旧超大型锡多金属矿区花岗岩成因类型. 矿床与地质, 20(4~5): 413~417.
- 裴先治,李佐臣,丁仁平,李瑞保,冯建赉,孙雨,张亚峰,刘战庆. 2009. 扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和岩石地球化学及其构造意义. 地学前缘, 16(3): 231~248.
- 彭程电. 1985. 试论个旧锡矿成矿条件及矿床类型、模式. 云南地质, 4(1): 154~163.
- 谭俊,魏俊浩,李水如,王忠铭,付乐兵,张可清. 2008. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义. 地球科学, 33(6): 743~754.
- 王新光,朱金初. 1992. 个旧花岗岩的成因、演化及找矿意义. 大地构造与成矿学, 16(4): 379~387.
- 汪志芬. 1983. 关于个旧锡矿成矿作用的几个问题. 地质学报, 57(2): 154~162.
- 伍勤生,许俊珍,杨志. 1984. 个旧含 Sn 花岗岩的 Sr 同位素特征及找矿标志的研究. 地球化学, (4): 293~302.
- 谢洪晶,张乾,祝朝辉,范良伍,王大鹏. 2009. 滇东南薄竹山花岗岩岩石学及其稀土一微量元素地球化学. 矿物学报, 29(4): 481~490.
- 杨宗喜,毛景文,陈懋弘,程彦博,常勇. 2010. 云南个旧卡房铜矿床地质地球化学特征及其成因探讨. 岩石学报, 26(3): 830~844.
- 冶金工业部西南冶金地质勘探公司. 1984. 个旧锡矿地质. 北京: 冶金工业出版社, 8~137.
- 张欢,高振敏,马德云,陶球. 2003. 云南个旧锡矿床成因研究综述. 地质地球化学, 31(3): 70~75.
- 张世涛,冯明刚,吕伟. 1998. 滇东南南温河变质核杂岩解析. 中国区域地质, 17(4): 390~397.
- 赵振华,增田彰正,Shabani M B. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应. 地球化学, (3): 221~233.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社, 7~55.
- 赵振华,熊小林,韩小东. 1999. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机制探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例. 中国科学(D 辑), 29(4): 331~338.
- 赵振华,包志伟,乔玉楼. 2010. 一种特殊的“M”与“W”复合型稀土元素四分组效应: 以水泉沟碱性正长岩为例. 科学通报, 55(15): 1474~1488.
- 周新民等. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 123~435.
- 朱弟成,莫宣学,王立全,赵志丹,牛耀龄,周长勇,杨岳衡. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr—Nd—Hf 同位素约束. 中国科学(D 辑), 39(7): 833~848.
- 庄永秋,王任重,杨树培,尹金明. 1996. 云南个旧锡铜多金属矿床. 北京: 地震出版社, 1~107.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P. ed. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: Constrains on their petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 120: 258~276.
- Cox C G, Bell J D, Pankhurst R J. 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. London: George, Allen and Unwin.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101: 635~643.

- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rocks system. *Earth-Science Review*, 37: 215 ~ 224.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic settings of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13(1): 97 ~ 108.
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian, Li Youguo. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan (Xizang) plateau. *Lithos*, 74: 131 ~ 148.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of minor elements. *Lithos*, 22: 247 ~ 263.
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Harlow: Longman Scientific & Technical Limited, 1 ~ 352.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic basalt: implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J. eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, Special Publication, 42: 313 ~ 345.
- Sylvester Paul J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29 ~ 44.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, Jahn Bor-ming, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143 ~ 173.

Petrology, Geochemistry and Petrogenesis of the Baishachong and Beipaotai Granitic Stocks in Gejiu, Yunnan Province, Southwest China

LI Xiaolong¹⁾, MAO Jingwen^{1,2)}, CHENG Yanbo¹⁾

1) *Faculty of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

2) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

Abstract: The Baishachong and Beipaotai granites are both located in the eastern part of the Gejiu orefield, Yunnan province. In lithology, the Baishachong granite is mainly equigranular biotite granite, whereas the Beipaotai granite is mainly porphyritic biotite granite. In this paper, a systematic petrological, geochemical, and Nd, Sr isotopic study is carried out. On the basis of previous zircon SHRIMP dating, combing the new data obtained in this study, the characteristics, evolution and petrogenesis of the two granitic stocks are documented. The results show that the Baishachong granite is a high-K calc-alkaline peraluminous granite while the Beipaotai granite belongs to shoshonitic metaluminous granite. Both of the Baishachong and the Beipaotai granitoids are enriched in Rb, Pb and U; and depleted in Ba, Sr, Nb, P and Ti. The Baishachong granite shows a lower Σ REE, but stronger negative δ Eu anomaly than the Beipaotai granite. What's more, the Baishachong granite reflects a tetrad-like effect with a shape of "M". Nd isotopic compositions suggest that the source of both the Baishachong and the Beipaotai granites are mainly derived in the crustal. Geochemical characteristics imply that both the Baishachong and the Beipaotai granites experienced a crystal fractionation process, while compared with the Beipaotai granite, the Baishachong granite experienced much stronger fractionated evolution process. The data of the Cretaceous granites around the Youjiang depression area located in southeastern Yunnan and western Guangxi Provinces, western South China, indicate that the granitic magmatism might be related to the lithospheric extension of the South China Block in late Mesozoic.

Key words: granite; petrology; petrochemistry; Nd, Sr isotopes; Gejiu orefield; Yunnan Province