

东准噶尔贝勒库都克铝质 A 型花岗岩的厘定及意义

李永军¹, 杨高学¹, 吴宏恩², 司国辉¹, 金朝¹, 张永智²

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 新疆维吾尔自治区有色地质矿产勘察院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 初步研究表明, 长期以来被认为 S 型花岗岩的贝勒库都克黑云母花岗岩应为铝质 A 型花岗岩。该岩体以富硅 ($\text{SiO}_2 = 75.25\% \sim 76.67\%$) 和碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.08\% \sim 8.97\%$), 贫镁 ($\text{MgO} = 0.02\% \sim 0.18\%$) 和钙 ($\text{CaO} = 0.39\% \sim 0.89\%$), 氧化指数变化较大 ($W = 0.02 \sim 0.15$) 以及高 FeO^T/MgO 比值 ($12.71 \sim 84.51$, 平均 34.55) 为特征。其 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{NK}/\text{A} = 0.86 \sim 0.95$ (平均 0.92), $\text{A}/\text{CNK} = 0.97 \sim 1.02$ (> 0.95), 属偏铝-过铝质钙碱-弱碱性岩石。在微量元素和稀土元素组成上, 岩石富 Ga, Zr 和 Hf 等高场强元素, 亏损 Ba, Nb, Sr 等元素。10 000 Ga/Al 比值 ($2.97 \sim 4.20$) 均大于 A 型花岗岩的下限值 (2.6), 明显高于 I 型和 S 型花岗岩的平均值 (分别为 2.10 和 2.28)。在 Zr, Ce, Nb 对 10 000 Ga/Al 以及 FeO^T/MgO 对 (Zr + Nb + Ce + Y)、 SiO_2 等 A 型花岗岩多种判别图上, 投影点均落在 A 型花岗岩区, 而与高分异的 I, S 型花岗岩明显不同。这些特征表明, 贝勒库都克黑云母花岗岩与国内外铝质 A 型花岗岩 (如福建沿海、东西准噶尔和澳大利亚 Lachlan 褶皱带铝质 A 型花岗岩) 十分相似。在 Nb-Y-Ce- R_1 -Ga/Al 和 R_1 - R_2 构造环境判别图上, 显示出造山后花岗岩的特征。贝勒库都克铝质 A 型花岗岩的厘定, 不仅对探讨卡拉麦里地区地壳物质组成及构造演化有着重要的地质意义, 还为我国新疆北部寻找与铝质 A 型花岗岩有关的锡矿资源开辟了方向。

关键词: 铝质 A 型花岗岩; 地球化学; 地质意义; 贝勒库都克; 东准噶尔

中图分类号: P588.12⁺1; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)01-0017-09

The determination of Beilekuduke aluminous A-type granites in east Junggar, Xinjiang

LI Yong-jun¹, YANG Gao-xue¹, WU Hong-en², SI Guo-hui¹, JIN Zhao¹ and ZHANG Yong-zhi²

(1. Earth Science & Land Resources College of Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Institute of Geology for Exploration of Nonferrous Metals, Urumqi 830000, China)

Abstract: The Beilekuduke biotite granites in the study area have long been thought to be of S-type. Nevertheless, the preliminary research conducted by the authors shows that biotite granites are actually typical aluminous A-type granites, which have the following characteristics: enriched silica ($\text{SiO}_2 = 75.25\% \sim 76.67\%$) and alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.08\% \sim 8.97\%$), low magnesium ($\text{MgO} = 0.02\% \sim 0.18\%$) and calcium ($\text{CaO} = 0.39\% \sim 0.89\%$), obvious variation of oxidation index ($W = 0.02 \sim 0.12$), high FeO^T/MgO ratio ($12.71 \sim 84.51$, 34.55 on average). $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{NK}/\text{A} = 0.86 \sim 0.95$ (0.92 on average), $\text{A}/\text{CNK} = 0.97 \sim 1.02$ (higher than 0.95), thus belonging to sub-aluminous - ultra-aluminous calc-alkali - weak-alkali rocks. In trace element and REE characteristics, the rocks are enriched in HFSE (such as Ga, Zr and Hf) and depleted in Ba, Nb and Sr. 10 000 Ga/Al ratios ($2.97 \sim 4.20$) are exclusively higher than the lower limit value of the A-type granites (2.6), obvious higher than average values of I-, S-type granites (2.1 and 2.28 , respectively). In Zr, Ce, Nb versus 10 000 Ga/Al and FeO^T/MgO versus (Zr + Nb + Ce + Y), SiO_2 diagrams, the samples fall into the area of A-type granites,

收稿日期: 2008-03-17; 修订日期: 2008-09-16

基金项目: 区域地质矿产调查资助项目 (QD200508)

作者简介: 李永军 (1961-), 博士, 教授, 博导, 主要从事区域地质矿产调查和岩石地球化学研究, 电话: 029-82339078, E-mail: yongjunl@chd.edu.cn.

and are obviously different from things of I-, S-type granites. The above characteristics show that Beilekuduke biotite granites are very similar to such typical aluminous A-type granites in the world as aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province, in west and east Jungaar and in the Lachlan fold belt of southeastern Australia. In Nb - Y - Ce, $R_1 - Ga/Al$ and $R_1 - R_2$ tectonic diagrams, they belong to post-orogenic granites. The determination of the Beilekuduke typical aluminous A-type granites not only has geological significance in the study of the crust material composition and tectonic evolution in Kalamaili area but also opens up a new orientation in looking for tin resources related to aluminous A-type granites in northern Xinjiang.

Key words: aluminous A-type granite; geochemistry; geological significance; Beilekuduke; east Jungaar

Loiselle 和 Wones (1979) 以碱性 (alkaline)、缺水 (anhydrous)、非造山 (anorogenic) 为特征的 A 型花岗岩概念的提出, 受到了地质学家们的广泛重视。许多学者从地球化学角度提出一系列判别图解 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990, 1992), 强调高 Ga/Al 和富 HFSE 元素是这一类岩石的主要判别标志, 试图将它与分异的 I 或 S 型花岗岩区分开, 对这类岩石的深入研究起了重要推动作用。随着研究的深入, 人们发现除了传统的碱性 A 型花岗岩外, 它还应包括中等碱质、含少量水、准铝-过铝质而不含碱性暗色矿物的铝质 A 型花岗岩 (Eby, 1990; King *et al.*, 1997)。这类岩石虽然和分异的 I 或 S 型花岗岩在地球化学特征上有某些重叠, 但彼此还是可以分开的 (Whalen *et al.*, 1987)。华南地区 A 型花岗岩分布情况与澳大利亚 Lachlan 也有相似之处。洪大卫等 (1987)、邱检生等 (2000) 通过对福建沿海长数百千米的 A 型花岗岩带的研究, 也认为绝大多数的岩石类型仍然是亚碱性过铝质的黑云母晶洞花岗岩。最近, 在东、西准噶尔以及柴达木盆地有铝质 A 型花岗岩的报道 (陈丹玲等, 2001; 苏玉平等, 2006a, 2006b)。通过研究笔者认为东准噶尔贝勒库都克花岗岩属于铝质 A 型花岗岩, 而前人研究认为其为偏碱性花岗岩, 成因上属于 S 型花岗岩 (毕承思等, 1993; 卢秋霞等, 1994; 吴郭泉等, 1997; 刘家远等, 1997, 1999; 喻亨祥等, 1998)。前人研究主要集中在岩石系列划分及其与锡矿关系等方面, 缺乏系统的地球化学和同位素年代学的研究。本文将贝勒库都克黑云母花岗岩厘定为铝质 A 型花岗岩, 在报道岩石地球化学特征和形成时代的同时, 探讨了其岩石类型、成因及其构造意义。

1 地质概况

东准噶尔是巨型中亚造山带的一部分, 也是中亚-兴蒙巨型构造成矿域的重要组成部分, 构造上位于

西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块的结合部位, 是一个构造背景复杂、岩浆活动强烈的地区。该区分布有 3 条富碱花岗岩带, 从北向南依次沿额尔齐斯-玛因鄂博断裂、阿尔曼太断裂和卡拉麦里大断裂呈北西向展布 (忻建刚等, 1995; 刘家远等, 1999)。大断裂带将东准噶尔分割成不同块段, 构成东准噶尔西部地区总体构造格局, 控制各类花岗岩的侵入和空间展布 (刘家远等, 1999)。韩宝福等 (2006) 研究认为, 准噶尔晚古生代后碰撞深成岩浆活动在空间上没有受到重要地质界线 (如蛇绿岩带) 的分隔控制, 在有的地方花岗岩还可以侵位于蛇绿岩带之中。由此可见, 晚古生代后碰撞深成岩浆活动不但在准噶尔分布广泛, 而且在准噶尔北邻的阿尔泰造山带和南邻的天山造山带中均有发育, 具有广泛的区域性。

东准噶尔卡拉麦里地区位于东天山北部, 中亚造山带中部, 其北侧为西伯利亚板块, 南侧为准噶尔-吐哈地块。一条北西向延伸的蛇绿岩带沿卡拉麦里深大断裂断续分布, 其形成时代为早泥盆世, 可能是小洋盆的洋壳残片 (李锦轶等, 1990; 李锦轶, 1995)。区内出露的地层以泥盆纪和石炭纪的凝灰质粉砂岩、火山碎屑岩为主, 卡拉麦里深大断裂的南部零星分布有少量志留纪的地层。花岗岩类岩浆活动在该区大规模发育, 存在与金、铜成矿系列有关的钙碱性花岗岩和与锡成矿系列有关的碱性 A 型花岗岩 (毕承思等, 1993; 刘家远等, 1997; 唐红峰等, 2007; 林锦富等, 2007), 岩石类型包括花岗闪长岩、黑云母花岗岩、角闪石花岗岩和钠铁闪石碱性花岗岩等。其中, 富碱花岗岩类出露面积约 1100 km², 由不同期次、大小不等的岩体组成, 如库布苏南岩体、黄羊山花岗岩体和贝勒库都克黑云母花岗岩体等 (图 1)。贝勒库都克黑云母花岗岩体是卡拉麦里富碱花岗岩带最靠西的一个富碱岩体, 北邻库布苏南花岗闪长岩体, 南东为黄羊山碱性花岗岩体, 南邻卡拉麦里缝合带, 呈岩株状产出, 侵入到泥盆纪的碎屑岩建造中。笔者在进行“新

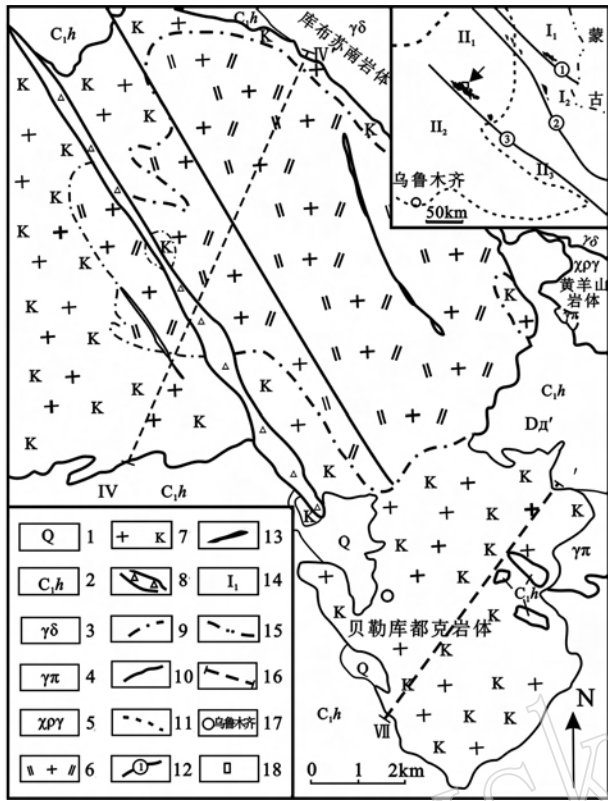


图 1 贝勒库都克岩体分布示意图(据 1:50 000 资料^①)

Fig. 1 Geological sketch map showing the distribution of the Beilekuduk granite in east Jungar (after 1:50 000 geological map^①)

1—第四系;2—下石炭统黑山头组;3—花岗闪长岩;4—花岗斑岩;5—碱长花岗岩;6—二长花岗岩;7—正长花岗岩;8—破碎带;9—脉动接触关系;10—侵入接触关系;11—构造带界线;12—断裂及编号;13—花岗岩带;14—构造区;15—国界;16—采样剖面位置及编号;17—地名;18—研究区;I₁—阿尔泰构造带;I₂—阿曼太构造带;II₁—卡拉麦里构造带;II₂—准噶尔盆地;II₃—将军庙构造带;①—额尔齐斯断裂;②—阿曼太断裂;③—卡拉麦里断裂

1—Quaternary; 2—Carboniferous Heishantao Formation; 3—granodiorite; 4—granite porphyry; 5—alkali-feldspar granite; 6—adamellite; 7—monzogranite; 8—shatter zone; 9—pulsation invasion; 10—invasion relationship; 11—tectonic belt boundary; 12—fault and its serial number; 13—granite belt; 14—tectonic area; 15—national boundaries; 16—place name; 17—sampling section location and its serial number; 18—study area; I₁—Altay tectonic belt; I₂—Aermantai tectonic belt; II₁—Kalamailli tectonic belt; II₂—Junggar basin; II₃—Jiangjunmiao tectonic belt; ①—Eerqisi fault; ②—Aermantai fault; ③—Kalamaili fault

疆青河、奇台县红柳沟—苏吉泉一带 1:5 万区域地质矿产调查”项目^①时,识别出黑云母二长花岗岩和黑云母正长花岗岩,两者为脉动接触关系,同时在黑云母正长花岗岩获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 284 Ma。

2 岩石学特征

贝勒库都克黑云母花岗岩体岩性为黑云母二长花岗岩和黑云母正长花岗岩,具中—细粒花岗结构、斑状结构、文象结构等,块状构造,主要矿物组成为碱性长石(35%~65%)、石英(20%~30%)、斜长石(10%~35%)及黑云母(1%~5%),次要矿物为角闪石,副矿物有磁铁矿、锆石、磷灰石、萤石等。碱性长石以正条纹长石为主;斜长石为更长石($An = 22 \sim 27$),普遍发育聚片双晶;黑云母常常包裹锆石等副矿物,在其内部形成多色晕圈,部分黑云母已蚀变成绿泥石、绢云母。

3 岩石化学组成

贝勒库都克岩体岩石化学分析结果及有关参数列于表 1,采样位置如图 1 所示,IV—IV'剖面采集 6 个样品, VII—VII'剖面 3 个样品(表 1 中样品分别以 IV 和 VII 开头)。从表 1 可以看出,黑云母花岗岩具有高硅($SiO_2 = 75.25\% \sim 76.67\%$)特征;相对富铝,样品的 Al_2O_3 含量($Al_2O_3 = 11.91\% \sim 12.86\%$)均在 11% 以上, A/CNK 值(0.97~1.02)大于 0.95,属准铝质或弱过铝质 A 型花岗岩;过碱指数($NK/A = 0.86 \sim 0.95$)较低,均在 1.0 以下,而碱性花岗岩则多大于 1.0;岩石的 Na_2O 和 K_2O 含量高, $Na_2O + K_2O$ 平均值 8.50%,且 $K_2O > Na_2O$;而 CaO 、 MgO 、 TiO_2 和 P_2O_5 的含量较低($CaO = 0.39\% \sim 0.89\%$, $MgO = 0.02\% \sim 0.18\%$, $TiO_2 = 0.03\% \sim 0.16\%$, $P_2O_5 = 0.01\% \sim 0.03\%$); FeO^T/MgO 值高(12.71~84.51),平均为 34.55,远高于一般 I 型(991 个样品平均值 2.27)、S 型(578 个样品平均值 2.38)、M 型(17 个样品平均值 2.37)花岗岩(Whalen *et al.*, 1987),而与世界 A 型花岗岩平均值(13.4)(Turner *et al.*, 1992)和东准噶尔苏吉泉 A 型花岗岩平均值(22.84)(苏玉平等, 2006b)相近;氧化指数 W (0.02~0.15)变化较大,不同于一般的 I 型和 S 型花岗岩,而与福建铝质 A 型花岗岩(邱检生等, 2000)及澳大利亚 A 型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987)的特征基本一致。Eby(1990)指出,对于高硅($SiO_2 > 74\%$)

① 新疆有色地质勘察院,长安大学地质调查院. 2008. 新疆青河、奇台县红柳沟—苏吉泉一带 1:5 万区域地质矿产调查.

表1 贝勒库都克岩体岩石常量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土之素($w_B/10^{-6}$)化学成分Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) contents of the Beilekuduke granite in east Junggar

序号 样品号	平均値									平均値			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	本文	苏吉泉	福建	澳大利亚
SiO ₂	76.67	76.37	76.34	75.96	75.88	75.53	75.34	75.33	75.25	75.85	76.15	77.49	73.81
TiO ₂	0.11	0.06	0.09	0.03	0.11	0.12	0.16	0.03	0.10	0.09	0.49	0.11	0.26
Al ₂ O ₃	11.91	12.22	12.21	12.72	12.20	12.51	12.54	12.86	12.51	12.41	10.41	12.24	12.4
Fe ₂ O ₃	0.04	0.16	0.23	0.18	0.15	0.05	0.10	0.08	0.28	0.14	1.87	1.24	
FeO	2.22	1.84	1.70	1.70	2.15	1.94	2.25	1.79	1.64	1.91	0.68	0.16	1.58
MnO	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14	0.06	
MgO	0.09	0.04	0.08	0.02	0.10	0.11	0.18	0.04	0.08	0.08	0.11	0.08	0.20
CaO	0.56	0.47	0.55	0.39	0.50	0.71	0.89	0.57	0.81	0.60	0.80	0.64	0.75
Na ₂ O	3.48	4.00	3.90	4.47	3.61	3.69	3.52	4.40	3.60	3.85	3.50	4.16	4.07
K ₂ O	4.60	4.54	4.45	4.22	4.88	4.83	4.64	4.57	5.13	4.65	4.15	4.25	4.65
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.23	0.04	
烧失	0.01	0.01	0.16	0.01	0.10	0.18	0.01	0.07	0.30	0.09	1.18	0.24	
总量	99.73	99.74	99.74	99.75	99.71	99.72	99.69	99.78	99.74	99.71	99.71	100.00	
NK/A	0.90	0.94	0.92	0.94	0.92	0.90	0.86	0.95	0.92	0.92	1.00	0.93	0.95
A/CNK	1.02	0.99	1.00	1.01	1.01	0.99	1.01	0.97	0.97	0.99	0.99	0.96	0.95
FeO ^T /MgO	25.92	55.01	22.99	84.51	22.00	18.24	12.71	46.48	23.10	34.55	22.84		13.40
W	0.02	0.08	0.12	0.09	0.07	0.03	0.04	0.04	0.15	0.07		0.80	
Na ₂ O + K ₂ O	8.08	8.54	8.35	8.69	8.49	8.52	8.16	8.97	8.73	8.50	7.65		
Ba	57.6	15.5	27.6	9.04	98.8	146	146	16.2	100	68.53	94.4	33.40	352
Rb	230	428	320	598	208	276	217	357	312	327.3	195.11	240.8	169
Sr	21.2	7.3	16.2	9.27	38.7	42.1	61.9	12.3	63.2	30.24	16.15	3.6	48
Y	82.6	101	80.1	117	64.4	64	51	45.4	88.4	77.10	65.55	26.9	75
Zr	154	122	148	146	197	172	153	87.8	159	148.8	222.38	80.4	528
Nb	9.76	19	14.4	25.5	8.86	9.54	7.93	33.8	11.2	15.55	12.77	24.56	37
Th	20.4	27.4	17.2	46.4	23.1	22.8	19.2	23.4	26.1	25.11	14.40	33.6	23
Ga	21.9	26.9	25.8	28.3	19.5	22.3	19.7	27.8	21.8	23.78	22.62	18.2	24.6
Ni	3.88	2.32	2.73	2.98	4.11	3.03	3.54	2.79	4	3.26	12.48	5.22	1
Cr	4.5	12.2	16	10.6	20.2	12.1	11	24.5	11.4	13.61	29.14		
Hf	7.05	8.09	7.3	11.1	7.14	7.33	5.78	10.8	7	7.95	8.47	4.44	
Sc	2.61	3.28	2.28	3.28	2.34	2.81	3.33	4.18	2.4	2.95	3.40	2.75	4
Ta	0.5	2.31	1.38	4.23	0.59	0.79	0.57	9.6	1.08	2.34	1.41	2.34	
Co	1.65	1	1.29	1.2	2.01	1.86	2.43	1.16	1.47	1.56			
Li	88.4	150	38.3	320	20.4	86.1	88.6	14.6	81.6	98.67			
Be	4.99	6.04	7.97	20.5	5.1	7.39	5.18	14.1	5.2	8.50			
B	8.99	7.68	9.49	46.2	7.17	12.6	7.07	9.4	13	13.51			
W	1.26	2.69	2.24	8.9	1.34	1.38	2.38	2.2	2.01	2.71			
Sn	6	19.5	13.5	80	7.6	8	9	9.15	16.5	18.81			
Mo	0.79	0.76	1.33	1.12	2.37	0.83	1.06	0.92	2.52	1.30			
La	37.7	22	25.2	13.7	38.1	33.3	38.2	10.4	22.2	26.76	28.46	31	
Ce	86.8	57.8	60	37	83	74.5	76.5	24.8	54.4	61.64	62.00	53.9	137
Pr	12.9	8.02	8.59	5.44	12.5	10.2	11.1	3.21	7.43	8.82	8.03	6.08	
Nd	49.6	30.4	32.6	19.1	47.5	37.2	39.9	11.6	28	32.88	33.02	20.31	
Sm	12.6	9.08	9.11	6.18	12.2	8.72	8.97	3.25	7.24	8.59	8.12	3.96	
Eu	0.16	0.02	0.06	0.017	0.2	0.28	0.34	0.03	0.19	0.14	0.10	0.36	
Gd	12.1	8.46	8.67	5.86	11.4	8.68	9.17	2.94	7.04	8.26	9.62	3.91	
Tb	2.56	2.2	2.03	1.77	2.32	1.76	1.7	0.75	1.68	1.86	1.62	0.64	
Dy	14.9	14.8	12.8	13.6	12.8	10.2	9.12	5.6	11.2	11.67	10.38	3.79	
Ho	3.09	3.28	2.8	3.32	2.56	2.18	1.88	1.35	2.55	2.56	2.28	0.9	
Er	9.02	10.1	8.56	11.6	7.36	6.68	5.56	5.21	8.07	8.02	6.70	2.8	
Tm	1.67	2.14	1.72	2.89	1.36	1.31	1.05	1.54	1.7	1.71	1.03	0.47	
Yb	10.6	14.6	11.1	22.1	8.71	8.89	6.96	14.6	11.4	12.11	6.89	3.28	
Lu	1.48	2.1	1.56	3.4	1.19	1.3	0.97	2.46	1.67	1.79	1.02	0.48	
LREE	199.8	127.3	135.6	81.4	193.5	164.2	175	53.3	119.5	138.8			
HREE	138	158.7	129.3	181.5	112.1	105	87.4	79.9	133.7	125.1			
ΣREE	337.8	286	264.9	263	305.6	269.2	262.4	133.1	253.2	263.9			
LREE/HREE	1.45	0.80	1.05	0.45	1.73	1.56	2.00	0.67	0.89	1.18			
δEu	0.04	0.01	0.02	0.01	0.05	0.10	0.11	0.03	0.08	0.05	0.02		
δCe	0.95	1.05	0.98	1.03	0.91	0.97	0.88	1.03	1.02	0.98			
(La/Yb) _N	2.4	1.02	1.53	0.42	2.95	2.53	3.70	0.48	1.31	1.82			
(La/Sm) _N	1.88	1.52	1.74	1.39	1.96	2.40	2.68	2.01	1.93	1.95			
(Gd/Yb) _N	0.92	0.47	0.63	0.21	1.06	0.79	1.06	0.16	0.50	0.64			
10 000 Ga/Al	3.68	4.40	4.23	4.45	3.20	3.57	3.14	4.32	3.49	3.83	4.21		

序号1~5为黑云母正长花岗岩,6~9为黑云母二长花岗岩;样品由宜昌地质研究所岩矿测试室完成,主量元素用湿化学方法测定,稀土、微量元素用ICP原子光谱方法分析;NK/A = (Na₂O + K₂O)/Al₂O₃ (分子比); A/CNK = Al₂O₃/(Na₂O + K₂O + CaO) (摩尔比), FeO^T = FeO + 0.9 Fe₂O₃;氧化指数 W = Fe₂O₃/(FeO + Fe₂O₃);东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩数据引自苏玉平等(2006)文献中6个样品平均值;福建铝质 A 型花岗岩数据引自邱检生等(2000)文献中9个样品平均值;澳大利亚铝质 A 型花岗岩148个样品平均值数据引自 Whalen 等(1987)。

花岗岩, $FeO^T/MgO - SiO_2$ 图解最有效地把大多数 A 型花岗岩与 I 型、S 型花岗岩区别开来, 贝勒库都克花岗岩在该图解中落入 A 型花岗岩区(图 2)。贝勒库都克岩体岩石化学特征总体上与铝质 A 型花岗岩相似。

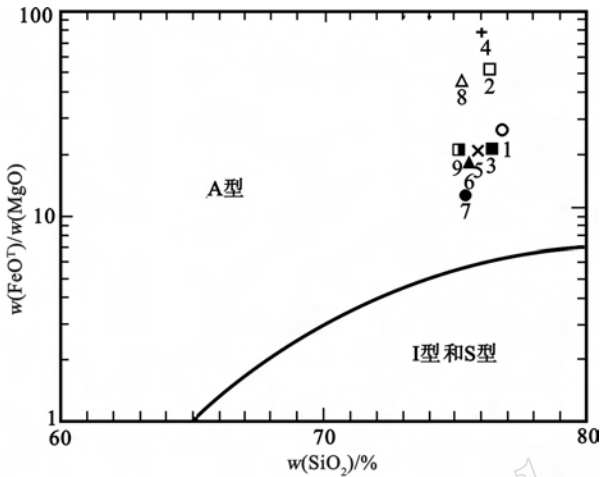


图 2 $FeO^T/MgO - SiO_2$ 判别图解(Eby, 1990)

Fig. 2 $FeO^T/MgO - SiO_2$ discrimination diagram (after Eby, 1990)

样品号同表 1, 下同

sample number as for Table 1

4 地球化学特征

贝勒库都克岩体微量及稀土元素含量列于表 1。微量元素总的特点: Ga 丰度较高($19.5 \times 10^{-6} \sim 28.3 \times 10^{-6}$), 具有较高的 10 000 Ga/Al 值(3.20 ~ 4.45), 与苏吉泉 A 型花岗岩其平均值(4.21)(苏玉平等, 2006a)相近, 均大于 A 型花岗岩的下限值(2.6)(Whalen *et al.*, 1987), 明显高于 I 型和 S 型花岗岩的平均值(分别为 2.1 和 2.28)(Whalen *et al.*, 1987); HFSE 元素含量高, 元素组合 $Nb + Zr + Ce + Y = 191.8 \times 10^{-6} \sim 353.3 \times 10^{-6}$, 平均为 303.1×10^{-6} , 略低于 A 型花岗岩下限值(350×10^{-6})(Whalen *et al.*, 1987); 在原始地幔标准化蛛网图(图 3)上, 表现为 Rb、Th、La、Ce、Nd、Hf、Zr 和 Sm 富集, 而 Ba、Nb、Sr 强烈亏损, 表明它是一种高演化成分的 A 型花岗岩; 在 $Zr - 10\ 000\ Ga/Al$ 、 $Ce - 10\ 000\ Ga/Al$ 、 $Nb - 10\ 000\ Ga/Al$ 、 $Y - 10\ 000\ Ga/Al$ 、 $NK/A - 10\ 000\ Ga/Al$ 、 $FeO^T/MgO - (Nb + Zr + Ce + Y)$ 6 幅图解(图 4)上, 贝勒库都克岩体不仅与一般 I、S 和 M 型花岗岩有明显差别, 而且与分异作用完全的 I、S

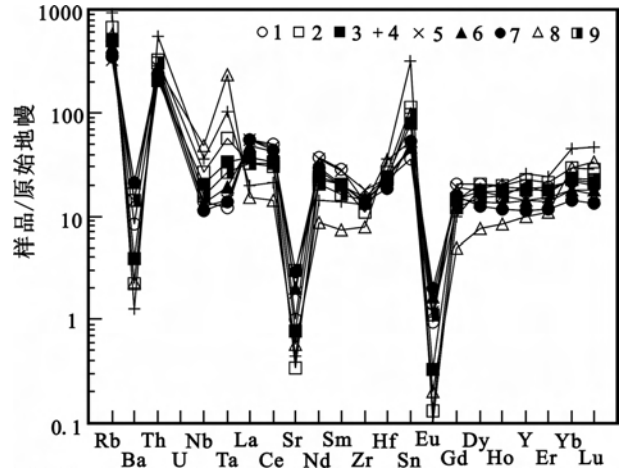


图 3 贝勒库都克岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图(据 Pearce, 1984)

Fig. 3 Primitive-mantle normalized trace element spidergrams (after Pearce, 1984)

原始地幔标准化值来自 Sun 和 McDonough(1989)
primitive-mantle data from Sun and McDonough(1989)

型长英质花岗岩也能很好地区别开来。因此, 贝勒库都克岩体应归属为 A 型花岗岩类。

黑云母花岗岩的稀土元素含量较高, ΣREE 大多接近 300×10^{-6} , 是本区与金、铜成矿关系密切的钙碱性花岗岩类($\Sigma REE = 52.73 \times 10^{-6} \sim 132.58 \times 10^{-6}$)的 2 ~ 3 倍(喻亨祥等, 1998), $LREE/HREE = 0.45 \sim 2.00$, $(La/Yb)_N < 5$, 轻、重稀土元素的分馏不明显, $(La/Sm)_N = 1.39 \sim 2.68$, $(Gd/Yb)_N = 0.16 \sim 1.06$, 其分馏程度明显不及尼日尼亚及我国山海关等地产于裂谷、类裂谷环境的钠闪石花岗岩(Bowden and Kinnaird, 1984), 而与祁漫塔格铝质 A 型花岗岩较为相似(陈丹玲等, 2001)。Eu 的负异常极强, $\delta Eu = 0.01 \sim 0.11$, 表明岩石经历了强烈的斜长石分离结晶作用。稀土元素球粒陨石标准化模式图为典型的 A 型花岗岩所特有的海鸥式(图 5), 与东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩极为相似。因而, 贝勒库都克花岗岩的稀土元素和微量元素均显示了铝质 A 型花岗岩的普遍特征。

5 讨论与结论

最早的研究认为, A 型花岗岩以富碱、贫水和非造山为标志, 它一般是碱过饱和而铝不饱和。但近年来的研究已将 A 型花岗岩的概念外延, 它不仅包括碱过饱和的碱性花岗岩, 也包括准铝质、过铝质以及强过铝

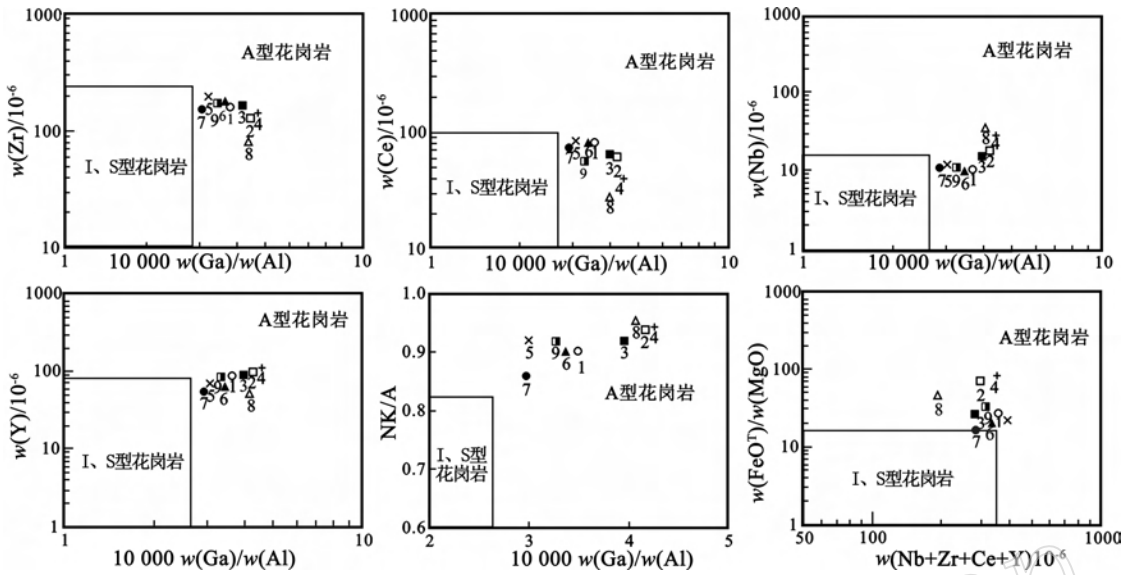


图 4 Zr、Ce、Nb、Y、NK/A - 10 000 Ga/Al 以及 $\text{FeO}^T/\text{MgO} - (\text{Nb} + \text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解(据 Whalen 等, 1987)

Fig. 4 Zr, Ce, Nb, Y, NK/A - 10 000 Ga/Al and $\text{FeO}^T/\text{MgO} - (\text{Nb} + \text{Zr} + \text{Ce} + \text{Y})$ discrimination diagrams(after Whalen *et al.*, 1987)

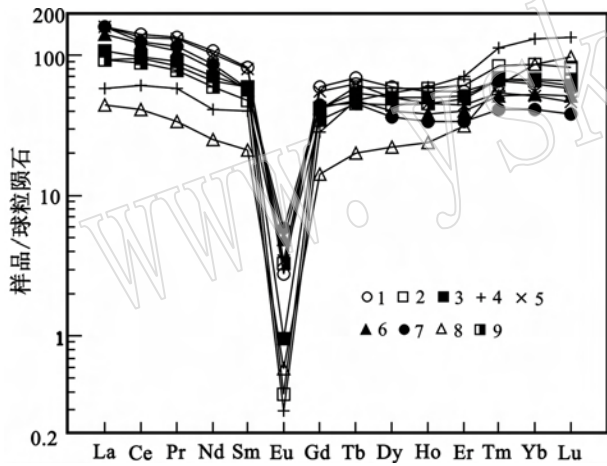


图 5 稀土元素配分模式图(据亨德森,1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (after Henderson, 1989)

球粒陨石标准化值来自 Sun 和 McDonough(1989)
chondrite data from Sun and McDonough(1989)

质的铝质 A 型花岗岩。贝勒库都克花岗岩的岩石化学及微量元素特征表明,它是典型的铝质 A 型花岗岩,岩石具有较高的 K_2O 、 Na_2O 含量和高的 FeO^T/MgO 、 Ga/Al 比值以及低的 CaO 、 MgO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量,明显不同于 I 型和 S 型花岗岩;多阳离子参数 R_2 值较高,主要变化于 291.45 ~ 349.99 之间,不同于碱性花岗岩的 R_2 值(多数 < 280);Ti 和 P 的含量均很低,大部分样品的 P_2O_5 含量为 0.01%,这与相对富铝的 S 型花岗岩明显有别,后者常具较高的

P_2O_5 含量(一般 > 0.10%),且随分异作用的进行 P_2O_5 有递增的趋势,因此,铝质 A 型花岗岩与 S 型花岗岩富铝的内在原因可能存在本质差别,其 Ti 和 P 显著偏低的特点反映岩浆经历了高程度的钛铁矿、磷灰石等矿物的分离结晶作用。总之,贝勒库都克黑云母花岗岩不是分异的 I 或 S 型花岗岩,也不同于一般的碱性 A 型花岗岩,而是典型的铝质 A 型花岗岩。

将贝勒库都克黑云母花岗岩厘定为铝质 A 型花岗岩,这一结论和苏玉平等(2006a,2006b)的认识完全一致。该岩体地球化学特征和成因类型的再认识,不仅对探讨卡拉麦里地区地壳物质组成及构造演化有着重要的地质意义,还为在我国新疆北部寻找与铝质 A 型花岗岩有关的锡矿资源开辟了方向。

铝质 A 型花岗岩的产出往往能够指示一定的构造意义。A 型花岗岩的形成均与地壳的拉张作用有关,因此,自从 Loiselle 等(1979)首次提出 A 型花岗岩的概念以来,在该方面的研究一直受到国内外地质学者的高度关注,并取得了许多重要成果。近年来的研究表明(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992; 周珣若,1994; 王德滋等,1995; 洪大卫等,1995),A 型花岗岩可细分为非造山和后造山两类,分别命名为 A_1 和 A_2 型或 AA 和 PA 型,它们具有不同的物质来源并分别对应于不同的大地构造环境,其中, A_1 (或 AA)型来源于似大洋岛弧玄武岩但侵入于大陆裂谷或在板内岩浆作用期间侵入,

形成于大陆岩石圈稳定之后的拉张阶段，是裂谷活动开始的征兆； A_2 (或 PA) 型花岗岩浆则直接起源于经历了陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用的陆壳或板下地壳，标志造山作用结束后不久即开始的拉张，其规模和深度均较小，是造山作用结束的标志。在 Nb - Y - Ce (图 6) 和 $R_1 - 10\,000\text{ Ga}/\text{Al}$ (图 7) 判别图上，样品均落入 A_2 、PA 区。在 $R_1 - R_2$ 构造环境判别图 (图 8) 上，则显示出造山后花岗岩的特征，表明贝勒库都克黑云母花岗岩形成于碰撞结束之后的造山后伸展阶段。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明，贝勒库都克黑云母花岗岩形成的时代 (284Ma) 属于东准噶尔后碰撞深成岩浆活动的范围 330 ~ 265Ma 之间 (韩宝福等, 2006)，略晚于东准噶尔乌伦古河碱性花岗岩

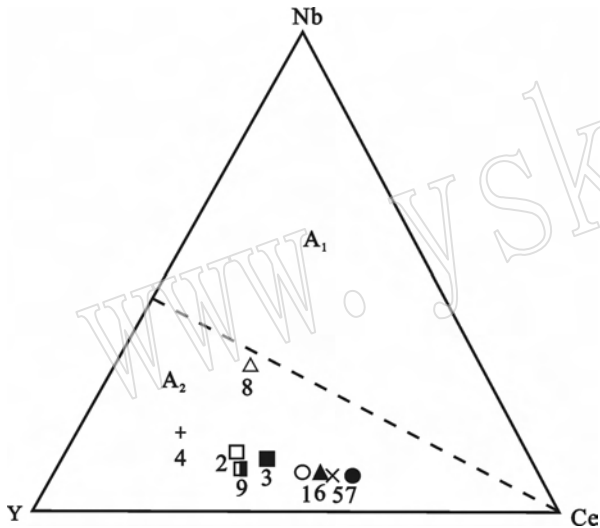


图 6 Nb - Y - Ce 判别图 (据 Eby, 1992)

Fig. 6 Nb - Y - Ce discrimination diagrams (after Eby, 1992)

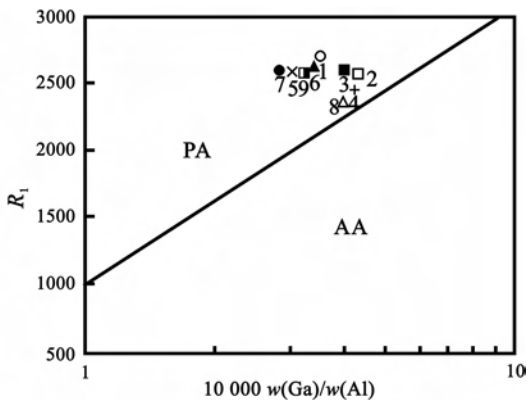


图 7 $R_1 - 10\,000\text{ Ga}/\text{Al}$ 判别图 (据洪大卫等, 1995)

Fig. 7 $R_1 - 10\,000\text{ Ga}/\text{Al}$ discrimination diagrams (after Hong Dawei *et al.*, 1995)

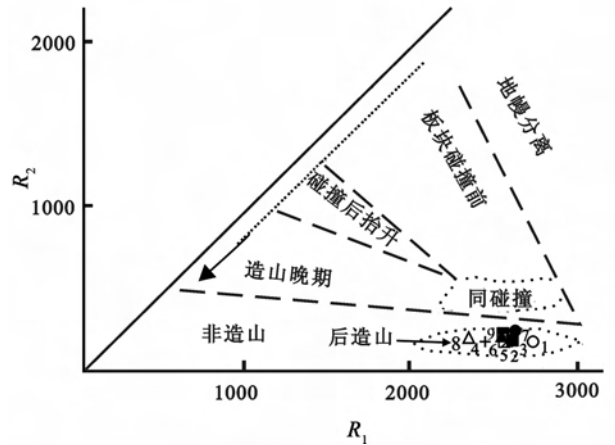


图 8 $R_1 - R_2$ 构造环境判别图解 (据 Batchelor and Bowden, 1985)

Fig. 8 $R_1 - R_2$ tectonic environments discrimination diagram (after Batchelor and Bowden, 1985)

(王式洸等, 1994; Han Baofu *et al.*, 1997) 和卡拉麦里碱性花岗岩 (顾连兴等, 1990; 毕承思等, 1994; 卢秋霞等, 1994) 的形成时代 (300 Ma 左右), 均为准噶尔周边地区碰撞后岩浆活动的产物。这一认识与东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代构造-岩浆演化过程大致一致。

已有的研究表明 (李锦轶等, 1990; 李锦轶, 1995), 卡拉麦里蛇绿岩时代为早泥盆世。泥盆纪, 卡拉麦里有限洋盆形成并持续向两侧的陆块俯冲, 并在陆块边缘产生了陆缘火山弧; 早石炭世, 两侧的陆块相连, 卡拉麦里有限洋盆关闭并转变为陆间残余海盆; 晚石炭世, 碰撞造山作用结束, 由被深埋的洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳 (可能还含有少量陆间残余海盆沉积物) 经过部分熔融和结晶分异作用以及幔源岩浆的混合作用产生大面积分布的富碱花岗岩岩浆沿深大断裂就位, 形成富碱花岗岩带, 从晚石炭世末期开始, 全区进入板内演化阶段。

References

Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chem. Geol.*, 48: 43 ~ 55.

Bi Chengsi, Shen Xiangyuan, Xu Qingsheng, *et al.* 1993. Geological characteristics of stanniferous granites in the Beilekuduk tin metallogenic belt, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3): 213 ~ 223 (in Chinese with English abstract).

Bi Chengsi, Shen Xiangyuan and Xu Qingsheng. 1994. Isotope geology of

- the Beilekuduke tin metallogenic belt in Xinjiang[J]. *Geoscience of Xinjiang*, (5): 106~119(in Chinese with English abstract).
- Bowden P and Kinnaird J A. 1984. The petrology and geochemistry of alkaline granites from Nigeria[J]. *Phys. Earth Planet. Int.*, 35: 199~211.
- Chen Danling, Liu Liang, Che Zicheng, *et al.* 2001. Determination and preliminary study of Indosinian aluminous A-type granites in the Qirnantag area, southeastern Xinjiang[J]. *Geochimica*, 30(6): 540~546(in Chinese with English abstract).
- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Gu Lianxing, Zhu Qiang, Hu Shouxi, *et al.* 1990. Geological characters and origin of the Kelameili-Harlik alkali granite belt, Xinjiang[J]. *Geoscience of Xinjiang*, (5): 47~55(in Chinese).
- Hong Dawei, Guo Wenqi and Li Gejing. 1987. *Petrology and Genetic Evolutions of Mirolitic Granite Belts in Fujian Coastal Area* [M]. Beijing: Beijing Science Technical Press, 1~50 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, *et al.* 1995. Kind of tectonic settings of alkaline granite and discrimination indicator[J]. *Sci. China (series B)*, 25(4): 418~426(in Chinese).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077~1086(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Wang Shiguang, Jahn Borming, *et al.* 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implication for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 138: 135~159.
- Henderson P. 1989. *Rare Earth Element Geochemistry* [M]. Beijing: Geology Publishing House, 20~178(in Chinese).
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia[J]. *J. Petrol.*, 38: 371~391.
- Li Jinyi. 1995. Main characteristics and emplacement processes of the east Junggar ophiolites, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(supp.): 73~84(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, *et al.* 1990. Main characteristics of late Paleozoic plate tectonics in the southern part of east Junggar, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 36(4): 305~316(in Chinese with English abstract).
- Lin Jingfu, Yu Hengxiang, Yu Xinqi, *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological implication of the saabei-alkali-rich granite from Eastern Junggar of Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1876~1884(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiayuan, Yu Hengxiang and Wu Guoquan. 1997. Alkali granites and tin deposits of the Kalamali area, northern Xinjiang[J]. *Geological Exploration For Non-Ferrous Metals*, 6(3): 129~135 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiayuan, Yu Hengxiang and Wu Guoquan. 1999. Two kinds of alkaline granites in eastern Junggar, Xinjiang and their geological significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 18(2): 89~94(in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America, Abstract*, 11: 468.
- Lu Qiuxia and Liu Xianfan. 1994. Isotope geochemical studies on tin-bearing granite rock belt in west part of eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Geoscience of Xinjiang*, 5: 132~143(in Chinese with English abstract).
- Pearce A J. 1984. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Satoshi Kanisawa, *et al.* 2000. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province[J]. *Geochimica*, 29(4): 313~321(in Chinese with English abstract).
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Hou Guangshun, *et al.* 2006a. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 35(1): 55~67(in Chinese with English abstract).
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, *et al.* 2006b. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 175~184(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process [A]. Sowers A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geological Society Special Publication*, 42: 313~345.
- Tang Hongfeng, Qu Wenjun, Su Yuping, *et al.* 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit, with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: constraint from isotopic ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1989~1997(in Chinese with English abstract).
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: an example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28: 151~179.
- Wang Dezi, Zhao Guangtao and Qiu Jiansheng. 1995. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granitoids in eastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1(2): 13~22 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiguang, Han Baofu, Hong Dawei, *et al.* 1994. Geochemistry and tectonic significance of alkali granites along Ulungur river, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 29(4): 373~383(in Chinese).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407~419.
- Wu Guoquan, Liu Jiayuan and Yuan Kuirong. 1997. The composition of

- the Kalamaili high-alkaline granite belt, Xinjiang[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 17(1): 18~25 (in Chinese).
- Xin Jiangang, Yuan Kuirong and Liu Jiayuan. 1995. The alkali granites and their genesis and tectonic significance in the north area of the east Junggar, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 19(3): 214~226 (in Chinese with English abstract).
- Yu Hengxiang, Wu Guoquan and Liu Jiayuan. 1998. The two ore-forming metals series closely related to the two granitoid series in eastern Junggar, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 22(2): 119~127 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xunruo. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids[J]. Earth Sci. Frontiers, 1(1~2): 87~97 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 毕承思,沈湘元,徐庆生,等. 1993. 新疆贝勒库都克锡矿带含锡花岗岩地质特征[J]. 岩石矿物学杂志, 12(3): 213~223.
- 毕承思,沈湘元,徐庆生. 1994. 贝勒库都克锡矿带同位素地质学研究[J]. 新疆地质科学(第5辑): 106~119.
- 陈丹玲,刘良,车自成,等. 2001. 祁漫塔格印支期铝质A型花岗岩的确定及初步研究[J]. 地球化学, 30(6): 540~546.
- 韩宝福,季建清,宋彪,等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I): 后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 22(5): 1077~1086.
- 亨德森. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 20~178.
- 顾连兴,褚强,胡受奚,等. 1990. 新疆卡拉麦里-哈尔里克碱性花岗岩带地质特征及成因[J]. 新疆地质科学, (第2辑): 47~55.
- 洪大卫,郭文岐,李戈晶. 1987. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化[M]. 北京:北京科技出版社, 1~50.
- 洪大卫,王式洸,韩宝福,等. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. 中国科学(B辑), 25(4): 418~426.
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史[J]. 岩石学报, 11(增刊): 73~84.
- 李锦轶,肖序常,汤耀庆,等. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征[J]. 地质论评, 36(4): 305~316.
- 林锦富,喻亨祥,余心起,等. 2007. 新疆东准噶尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1876~1884.
- 刘家远,喻亨祥,吴郭泉. 1997. 新疆北部卡拉麦里富碱花岗岩带的碱性花岗岩与锡矿[J]. 有色金属矿产与勘查, 6(3): 129~135.
- 刘家远,喻亨祥,吴郭泉. 1999. 新疆东准噶尔两类碱性花岗岩及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 18(2): 89~94.
- 卢秋霞,刘显凡. 1994. 新疆东准噶尔西部含锡花岗岩带的同位素地球化学研究[J]. 新疆地质科学, (5): 132~143.
- 邱检生,王德滋,蟹泽聪史,等. 2000. 福建沿海铝质A型花岗岩的地球化学及岩石成因[J]. 地球化学, 29(4): 313~321.
- 苏玉平,唐红峰,侯广顺,等. 2006a. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质A型花岗岩的地球化学研究[J]. 地球化学, 35(1): 55~67.
- 苏玉平,唐红峰,刘丛强,等. 2006b. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质A型花岗岩的确定及其初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 175~184.
- 唐红峰,屈文俊,苏玉平,等. 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性A型花岗岩成因关系的年代学制约[J]. 岩石学报, 23(8): 1989~1997.
- 王德滋,赵广涛,邱检生. 1995. 中国东部晚中生代A型花岗岩的构造制约[J]. 高校地质学报, 1(2): 13~22.
- 王式洸,韩宝福,洪大卫,等. 1994. 新疆乌伦河碱性花岗岩的地球化学及其构造意义[J]. 地质科学, 29(4): 373~383.
- 吴郭泉,刘家远,袁奎荣. 1997. 新疆卡拉麦里富碱花岗岩带组成[J]. 桂林工学院学报, 17(1): 18~25.
- 忻建刚,袁奎荣,刘家远. 1995. 新疆东准噶尔北部碱性花岗岩的特征、成因及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 19(3): 214~226.
- 喻亨祥,吴郭泉,刘家远. 1998. 新疆东准噶尔地区两类花岗岩与两个成矿系列[J]. 大地构造与成矿学, 22(2): 119~127.
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用[J]. 地学前缘, 1(1~2): 87~97.