1000-0569/2009/025(11)-2924-32 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究*

杨武斌[1,2] 牛贺才[1**] 单强[1] 罗勇[1,2] 于学元[1] 裘愉卓[1]

YANG WuBin[1,2], NIU HeCai[1**], SHAN Qiang[1], LUO Yong[1,2], YU XueYuan[1] and QIU YuZhuo[1]

1. 中国科学院广州地球化学研究所，广州 510640
2. 中国科学院研究生院，北京 100049
1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

2009-04-28 收稿，2009-07-28 改回.

Yang WB, Niu HC, Shan Q, Luo Y, Yu XY and Qiu YZ. 2009. Ore-forming mechanism of the Baerzhe super-large rare and rare earth elements deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2924-2932

Abstract The major rock-forming minerals are same in both barren and mineralized alkaline granites at the Baerzhe deposit, mainly composed of microcline, quartz, riebeckite and albite. However, their relative contents and grain sizes are obviously different, as well as the compositions of fluid inclusions and the crystal habits of zircon also show significant differences in these two types of granites. The data on petrology, petrochemistry and element geochemistry suggest that the mineralized alkaline granite is not formed by means of the silicification and albitization of barren alkaline granite. The data also confirmed that these two types of granites are products of crystallization from a same magmatic system at different positions belonging different evolutional stages. And the characteristics on petrology, inclusions and geochemistry show that the highly evolved A-type granitic melt has stepped into magmatic-hydrothemal transition stage. The extraordinary enrichment and mineralization of rare and rare earth elements are closely related to the highly evolved A-type granite in the Baerzhe deposit.

Key words Baerzhe; Rare and rare earth elements; Barren and mineralized (Baerzhe) alkaline granites; Magmatic-hydrothemal transition stage; Mineralization

摘 要 巴尔哲矿床中的矿化和非矿化碱性花岗岩主要造岩矿物均为微斜长石、石英、钠闪石和钠长石，但其相对含量及颗粒大小明显不同，且两类岩石中包裹体的组成特征及锆石的结晶习性也有显著差异。主量元素分析显示，矿化与非矿化碱性花岗岩均以富硅、富碱、贫镁和钙为特征，为较典型的非造山A型花岗岩。尽管矿化碱性花岗岩中K_2O和Na_2O的含量均没有明显的增加，但其$Na+K/Al$、Na_2O+K_2O/CaO、FeO^*/MgO及K_2O/MgO等岩石化学参数与非矿化碱性花岗岩明显不同。在矿化碱性花岗岩中除了矿化的稀土元素及Nb、Zr强烈富集外，U、Th及Y也明显富集，而Ba、Sr、P、Eu和Ti表现为强烈的亏损。在非矿化碱性花岗岩中除了大离子亲石元素Rb略有富集外，稀土元素、Nb、Zr、U、Th、Ta及Y并无明显富集，虽然Sr、P、Eu和Ti也表现为亏损，但与矿化碱性花岗岩相比其亏损程度明显降低。岩相学、岩石化学及微量元素地球化学特征显示，矿化碱性花岗岩不可能是非矿化碱性花岗岩硅化和钠长石化作用的产物，二者应是同一岩浆体系不同演化阶段熔体固结的产物。K/Rb、Rb/Sr及δEu等地球化学参数显示，矿化碱性花岗岩是高演化A型花岗质熔体固结的产物；而岩石学、包裹体及地球化学特征则显示，这种高演化的A型花岗质熔体已经进入了岩浆-热液过渡阶段。巴尔哲矿床稀有稀土元素的超常富集和成矿与A型花岗岩的高演化过程密切相关。

关键词 巴尔哲 稀有稀土元素 矿化与非矿化碱性花岗岩 岩浆-热液过渡阶段 成矿作用

中图法分类号 P588.121; P618.7

---

* 本文由国家自然科学基金(40872066)和国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403504)联合资助.

第一作者简介：杨武斌，男，1984年生，博士研究生，地球化学专业，E-mail：yangwubin@gig.ac.cn

** **通讯作者**：牛贺才，男，1963年生，研究员，地球化学专业，E-mail：niuhc@gig.ac.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引言

巴尔哲超大型矿床位于内蒙古哲里木盟扎鲁特旗境内，矿体产在燕山期巴尔哲碱性花岗岩体(株)中。巴尔哲矿床为 REE-Zr-Be-Nb-Ta 多金属矿床，主要矿石矿物为兴安石(硅铍铈矿)、氟碳钙铈矿、独居石、烧绿石、铌铁矿和锆石等。巴尔哲矿床已探明金属储量为 RE_2O_3 储量近百万吨、ZrO_2 数百万吨、Nb_2O_5 数十万吨、Ta_2O_5 数万吨、BeO 数万吨(王一先和赵振华，1997)，其中锆和稀土元素的储量已达超大型矿床规模。巴尔哲矿床是一个典型的与 A 型花岗岩有关的超大型稀有稀土矿床，系统的矿床学和地球化学研究将进一步揭示稀有稀土元素富集规律，具有重要的理论意义。

国内一些学者对巴尔哲碱性花岗岩的地质地球化学特征及成因进行了有益探讨(王一先和赵振华，1997；Zhao *et al.*，2001；Jahn *et al.*，2001；袁忠信等，2003，2007)。王一先和赵振华(1997)研究发现，巴尔哲稀有稀土矿化作用主要集中在岩体的上部和边部，他们初步认为上部岩石稀土及稀有元素矿化受交代作用，特别是钠长石化作用的制约。袁忠信等(2007)根据造岩矿物的组成将巴尔哲碱性花岗岩体分为上下两个岩相带：下部为钠闪石碱性花岗岩带，主要组成矿物为微斜长石、微斜条纹长石、钠闪石及石英；上部为富钠长石的碱性花岗岩带，其内广泛发育晶洞和伟晶岩块(壳)。钠长石碱性花岗岩岩相带组成矿物为钠长石和石英，而微斜长石(微斜条纹长石)、钠闪石相对较少，稀有稀土元素矿化与该岩相带密切相关。已有的研究认为交代作用是导致岩相分带的主要因素，而稀有稀土元素的富集受流体/岩石反应过程的控制。

牛贺才等(2008)在巴尔哲含稀有稀土矿化碱性花岗岩中发现了富晶体-流体包裹体，并认为该岩相带及稀有稀土元素矿化是高演化碱性花岗质岩浆(岩浆-热液过渡阶段熔体)固结的产物。显然，矿化与非矿化碱性花岗岩的成因及二者相互关系是揭示巴尔哲超大型稀有稀土矿床成因的关键。本文拟通过矿化与非矿化碱性花岗岩的岩石学、岩石化学、微量元素地球化学的系统研究，揭示巴尔哲超大型稀有稀土矿床的成因机制。

关于巴尔哲碱性花岗岩体及稀有稀土矿床的地质特征前人已做过介绍(王一先和赵振华，1997；袁忠信等，2003；牛贺才等，2008)，本文不再重复。本研究的主量元素和微量元素分析是作者在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学重点实验室分别采用 X 射线荧光法(XRF)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)完成的，主量元素分析精度大多数优于 5%，微量元素分析精度大多优于 10%。

2 岩石学、矿物学及包裹体特征

巴尔哲岩体下部的非矿化碱性花岗岩主要由微斜长石

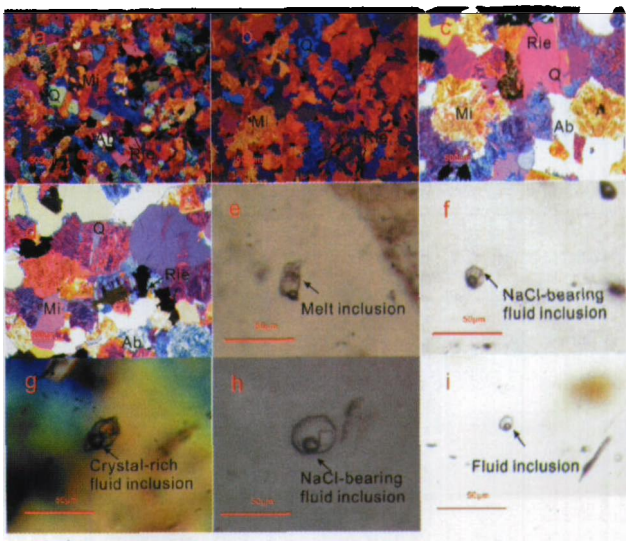


图 1 巴尔哲碱性花岗岩岩石及包裹体的显微照片

a-非矿化碱性花岗岩；b-非矿化碱性花岗岩；c-矿化碱性花岗岩；d-矿化碱性花岗岩；e-非矿化碱性花岗岩石英中熔融包裹体；f-非矿化碱性花岗岩石英中含氯化钠子晶的流体包裹体；g-矿化碱性花岗岩石英中富晶体-流体包裹体；h-矿化碱性花岗岩石英含氯化钠子晶的流体包裹体；i-矿化碱性花岗岩石英中流体包裹体

Fig. 1 Photomicrographs showing the petrological features and inclusions of the barren and mineralized alkaline granites in the Baerzhe deposit

a-Barren alkaline granites; b-Barren alkaline granites; c-Mineralized alkaline granites; d-Mineralized alkaline granites; e-Melt inclusion in barren granite; f-NaCl-bearing fluid inclusion in barren granite; g-Crystal-rich fluid inclusion in mineralized granite; h-NaCl-bearing fluid inclusion in mineralized granite; i-Fluid inclusion in quartz in mineralized granite

(微斜条纹长石)(50% ~55%)、石英(15% ~20%)、钠闪石(10% ~15%)和钠长石(8% ~12%)等造岩矿物组成。在该类岩石中微斜长石为自形-半自形矿物，大小在 0.2 ~0.6 × 0.2 ~0.4mm 之间；而石英、钠长石和钠闪石则为它形-半自形矿物，大小在 0.1 ~0.3 ×0.2 ~0.3mm 之间，明显小于微斜长石(图 1a，b)。

巴尔哲岩体上部的矿化碱性花岗岩主要由微斜长石(微斜条纹长石)(45% ~50%)、石英(20% ~30%)、钠长石(20% ~25%)等造岩矿物组成，含有少量的钠闪石。微斜长石(微斜条纹长石)呈自形-半自形产出，大小在 0.5 ~1mm × 0.4 ~1mm 之间；石英也呈自形-半自形，大小为 0.5 ~1mm ×0.6 ~1mm，有些石英包含着微斜长石和钠长石(图 1c，d)；它形-半自形的钠长石颗粒分布微斜长石与微斜长石或微斜长石与石英的粒间，其颗粒略小于微斜长石和石英，有些钠长石包裹着微斜长石颗粒。主要矿石矿物兴安石呈浸染状分布在由微斜长石、石英和钠长石构成的粒间，也有些穿插在不同的微斜长石矿物颗粒之间，其形成明显晚于微斜长石(图 1c，d)。与非矿化碱性花岗岩相比，矿化碱性花岗岩主要造岩矿物的自形程度略有提高、结晶颗粒明显增大。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

巴尔哲非矿化碱性花岗岩石英中尚未发现气-液两相流体包裹体,其包裹体以熔融包裹体为主,有少量的三相流体包裹体,氯化钠晶体所占比例大于30%,气相所占比例介于15%~20%之间(图1e, f)。矿化碱性花岗岩石英内不但有熔融包裹体,还分布着富晶体-流体包裹体、含氯化钠晶体的三相流体包裹体及气-液两相流体包裹体,在数量上以流体包裹体为主(图1g, h, i)。包裹体组合特征表明,巴尔哲非矿化和矿化碱性花岗岩均是岩浆固结的产物(均含有熔融包裹体),固结后均受到流体作用的影响(均含有三相流体包裹体),但矿化碱性花岗岩原始熔体内挥发分(主要是水)明显高于非矿化碱性花岗(含有大量的富晶体-流体包裹体和气-液两相包裹体),体系已经演化到岩浆-热液过渡阶段(Kamenetsk *et al.*,2004)。伟晶岩块(壳)及晶洞的存在也说明上部矿化碱性花岗岩富含挥发分,同时也说明在其结晶时体系的封闭性较好,为岩浆体系的演化创造了良好条件。

非矿化碱性花岗岩锆石一般小于0.03×0.1mm。其柱面十分发育,同时锥面也较发育,CL图像反映该类锆石具有明显的振荡环带,是典型岩浆成因锆石。与非矿化碱性花岗岩相比,矿化碱性花岗岩锆石含量明显增加,且颗粒较大,一般大于0.2×0.2mm。在该类岩石中大多数锆石的晶型较为特殊,其锥面十分发育,而柱基本不发育(偶尔可以见到很短的柱面),为典型的四方双锥体。Wang and Li(2002)曾在福建平潭辉长岩中发现过该类晶型的锆石,并认为它可能与过冷的结晶环境有关。此外,CL图像反映该类锆石没有明显的振荡环带(图略),与非矿化碱性花岗岩锆石明显不同,无论是在锆石数量、大小、晶型及内部结构特征等方面,巴尔哲矿化碱性花岗岩与非矿化碱性花岗岩均有明显的不同,这暗示形成两类岩石熔体的组成及物理化学特性应有显著的差别。

3 主量元素地球化学特征

巴尔哲矿化和非矿化碱性花岗岩明显富硅、富碱,贫钙和镁,具有高的Na+K/Al(原子比)和FeO*/MgO值(表1),为较典型的碱性花岗岩。非矿化碱性花岗岩SiO_2含量从64.82%变化到71.85%,Al_2O_3含量一般大于13%,Fe_2O_3含量低于5%,MnO_2含量从0.04%变化到0.09%,K_2O+Na_2O含量从7.79%变化到10.42%,CaO和MgO含量分别低于1.67%和0.70%。矿化碱性花岗岩SiO_2含量从70%变化到75.33%,Al_2O_3含量一般低于11%,Fe_2O_3含量从4.50%变化到8.33%,MnO_2含量从0.07%变化到0.15%,K_2O+Na_2O含量从8.55%变化到10.02%,CaO和MgO含量分别低于0.23%和0.14%。

表1 巴尔哲碱性花岗岩主量元素(%)与微量元素(10^{-6})含量

Table 1 The major and trace elements contents of the Baerzhe alkaline granites

	非矿化碱性花岗岩						矿化碱性花岗岩					
	BW2	B2-8	B3-1	B1-12	B1-3B	B2-50	B2-6	B1-10	B2-13	B1-9A	B2-10	B2-5B
SiO_2	71.85	71.31	70.42	64.82	69.35	69.19	70.80	73.60	72.00	75.33	72.80	74.50
TiO_2	0.17	0.25	0.24	0.48	0.22	0.22	0.18	0.17	0.70	0.22	0.28	0.13
Al_2O_3	13.62	13.33	15.16	16.27	13.45	13.83	9.86	9.75	10.48	10.55	10.07	10.31
Fe_2O_3	2.41	3.17	2.68	4.60	4.39	4.92	8.33	7.05	6.26	4.50	6.27	5.11
MnO	0.05	0.06	0.04	0.09	0.07	0.09	0.11	0.10	0.15	0.07	0.11	0.07
MgO	0.28	0.12	0.35	0.70	0.21	0.20	0.02	0.02	0.07	0.03	0.14	0.04
CaO	0.83	0.53	0.73	1.67	0.12	2.88	0.07	0.06	0.23	0.10	0.13	0.14
Na_2O	6.30	5.58	5.13	4.28	5.62	2.97	5.28	4.40	3.73	4.74	3.77	4.64
K_2O	3.72	4.85	4.63	6.14	5.59	4.82	4.74	4.32	5.25	3.81	5.60	4.25
P_2O_5	0.01	0.01	0.03	0.07	0.02	0.04	0.03	0.01	0.15	0.01	0.05	0.01
烧失率	0.70	0.74	0.55	0.83	0.74	0.78	0.53	0.49	0.91	0.59	0.72	0.75
Total	99.95	99.95	99.96	99.94	99.79	99.94	99.96	99.97	99.92	99.95	99.94	99.94
(Na+K)/Al	1.20	1.22	1.00	0.93	1.27	0.8	1.57	1.36	1.24	1.27	1.34	1.33
Sc	8.83	6.61	9.29	12.2	7.39	14.6	4.19	4.29	9.44	5.41	7.36	2.96
Ti	899	1334	1265	2482	1165	1129	655	850	3406	1133	1480	854
V	13.8	11.8	23.6	33.9	16.3	13.1	7.38	9.51	10.1	7.54	16.1	16.6
Cr	12.6	9.15	16.5	31.9	8.83	19.1	18.9	19.3	10.1	12.2	12.1	10.9
Mn	325	340	230	686	493	710	491	729	1075	468	8509	767
Co	0.86	0.87	2.10	4.09	1.44	1.68	0.63	1.08	0.52	0.39	1.30	0.42
Ni	6.77	4.20	5.88	8.87	5.08	6.42	8.25	8.26	4.54	3.65	4.16	3.58
Cu	9.64	10.2	46.3	17.3	8.61	25.3	8.24	14.1	10.0	8.86	19.3	8.44
Zn	202	173	35.1	57.4	311	37.9	292	501	915	606	497	1004
Ga	17.1	26.4	19.9	24.5	22.7	17.5	35.2	36.9	62.5	46.8	57.8	46.0

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

	非矿化碱性花岗岩						矿化碱性花岗岩					
	BW2	B2-8	B3-1	B1-12	B1-3B	B2-50	B2-6	B1-10	B2-13	B1-9A	B2-10	B2-5B
Ge	2.33	2.34	1.88	1.88	2.46	2.98	3.49	3.88	7.06	3.91	6.68	6.66
Rb	1545	272	151	212	527	144	368	953	1366	882	811	1206
Sr	120	36.9	144	260	5.39	158	2.11	3.44	22.23	4.89	18.5	6.68
Y	197	165	22.2	27.7	19.4	29.4	72.5	114	1239	508	562	219
Zr	219	676	220	254	460	341	1405	1942	19917	7477	6557	1072
Nb	27.6	72.5	10.3	26.2	61.6	11.6	86.2	114	2249	506	299	374
Ba	311	157	579	1830	81.9	1619	5.83	44.6	42.6	17.6	43.8	17.3
La	33.7	50.3	33.3	37.4	57.9	35.9	33.3	78.3	1923	336	1730	1107
Ce	104	141	73.0	76.5	111	73.3	89.8	197	5082	873	375	2303
Pr	15.8	20.6	8.56	9.72	12.9	9.08	12.0	29.2	645	109	424	291
Nd	62.9	94.2	31.4	37.3	39.2	33.6	49.1	108.3	2205	419	1218	957
Sm	19.1	26.2	5.82	7.59	5.45	6.33	11.7	26.9	401	107	240	176
Eu	0.52	0.41	0.54	1.53	0.08	0.93	0.09	0.22	3.00	0.85	1.78	1.14
Gd	20.4	26.9	4.84	6.80	3.96	5.74	11.9	23.9	334	99.8	194	128
Tb	4.38	4.50	0.74	1.07	0.59	0.99	2.19	4.11	50.7	16.1	28.3	14.3
Dy	27.1	25.3	4.19	6.00	3.52	5.61	14.6	23.7	287	92.6	135	61.4
Ho	5.49	4.80	0.82	1.13	0.76	1.09	3.30	4.68	55.4	18.2	23.5	9.39
Er	14.9	11.7	2.39	2.92	2.39	3.02	10.1	12.3	164	49.6	54.6	19.7
Tm	1.97	1.46	0.37	0.44	0.42	0.44	1.56	1.76	27.7	7.53	6.47	2.14
Yb	11.4	8.12	2.49	2.77	3.39	2.97	10.6	11.6	188	46.9	36.7	12.2
Lu	1.62	1.18	0.39	0.43	0.66	0.47	1.68	1.85	25.6	6.66	5.01	1.69
Hf	6.93	20.2	6.70	6.82	18.7	8.52	35.8	56.5	499	195	160	30.9
Ta	1.71	5.62	0.85	1.89	6.28	0.84	6.37	9.05	137	37.3	22.1	26.4
Pb	8.21	14.5	23.2	19.3	32.8	15.9	10.4	45.6	979	501	39.1	299
Th	3.88	6.25	14.4	15.6	12.5	10.5	19.1	22.3	861	107	37.8	397
U	1.38	5.34	3.97	3.67	4.68	3.16	11.3	17.7	208	53.7	39.6	16.1

与非矿化碱性花岗岩相比，矿化碱性花岗岩硅、铁和锰的含量明显增加，碱金属含量保持基本不变，而铝、钙和镁含量则明显降低。在矿化碱性花岗岩中无论是 K_2O，还是 Na_2O 的含量均没有明显增加，其矿物组成（主要是钠长石和钠闪石的相对含量）与非矿化碱性花岗岩的差异很可能与结晶的物理化学条件不同有关。矿化碱性花岗岩铁锰含量明显增加可能与铌、钽矿化有关。在哈克图解中两类碱性花岗岩具有明显演化关系（图2），暗示两类岩石在成因上有内在联系。在 K_2O-Na_2O 图解中巴尔哲碱性花岗岩（矿化与非矿化）的投影点均落在A型花岗岩的区域内（图略），在（Ga/Al）$\times10^4$ vs （Na_2O+K_2O）/CaO、（Ga/Al）$\times10^4$ vs FeO^*/MgO 及（Ga/Al）$\times10^4$ vs K_2O/MgO 图解中，巴尔哲碱性花岗岩的投影点也均落在A花岗岩区域内，只是矿化碱性花岗岩的A型花岗岩特征更典型一些（图3）。在 R_1-R_2 图解中巴尔哲两类碱性花岗岩的投影点主要落在非造山成因的花岗岩区域内（图略）。

4 微量元素地球化学特征

巴尔哲碱性花岗岩明显富集稀土元素及高场强元素 Zr、Hf，亏损过渡族元素及大离子亲石元素 Sr、Ba（表1），其稀土元素分布模式为V型（图4），显示其为高演化岩浆的产物。

在非矿化碱性花岗岩中稀土元素总量介于 168.9×10^{-6}～323.11×10^{-6} 之间，$(La/Yb)_n$ 从2变化到11.5，δEu 介于0.05～0.65之间（图4a）。与其它碱性花岗岩相同，在该类岩石中分散性元素 Ga 的含量较高，其（Ga/Al）$\times10^4$ 值介于2.37～3.78之间，大于一般的I和S型花岗岩（图3）。原始地幔标准化的微量元素蛛网图显示，在非矿化的碱性花岗岩中轻稀土元素、大离子亲石元素 Rb 和 Ba、高场强元素 Nb、Zr 及 Y 明显富集，而 Sr、P、Eu、U、Th 和重稀土元素则明显亏损（图5a）。

在矿化碱性花岗岩中稀土元素总量从 252×10^{-6} 变化到 11391×10^{-6}，其波动范围较大，显示在巴尔哲矿床中稀土元素矿化并不均匀。矿化碱性花岗类岩稀土元素分布模式也为V型（图4b），$(La/Yb)_n$ 从2变化到61，明显大于非矿化碱性花岗岩，δEu 均小于0.03，其亏损程度明显大于非矿化碱性花岗岩。稀土元素地球化学特征显示，尽管矿化与非矿化碱性花岗岩均为高演化岩浆固结产物，但矿化碱性花岗岩演化程度高于非矿化碱性花岗岩。原始地幔标准化的微量元素蛛网图显示，在矿化的碱性花岗岩中除了轻稀土元素、高场强元素 Nb、Zr 及 Y 强烈富集外，U、Th 也明显富集，同时在该类岩石中 Ba、Sr、P、Eu 和重稀土元素表现为亏损，其中 Sr、P 和 Eu 的亏损程度大于非矿化碱性花岗岩（图5b）。在

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

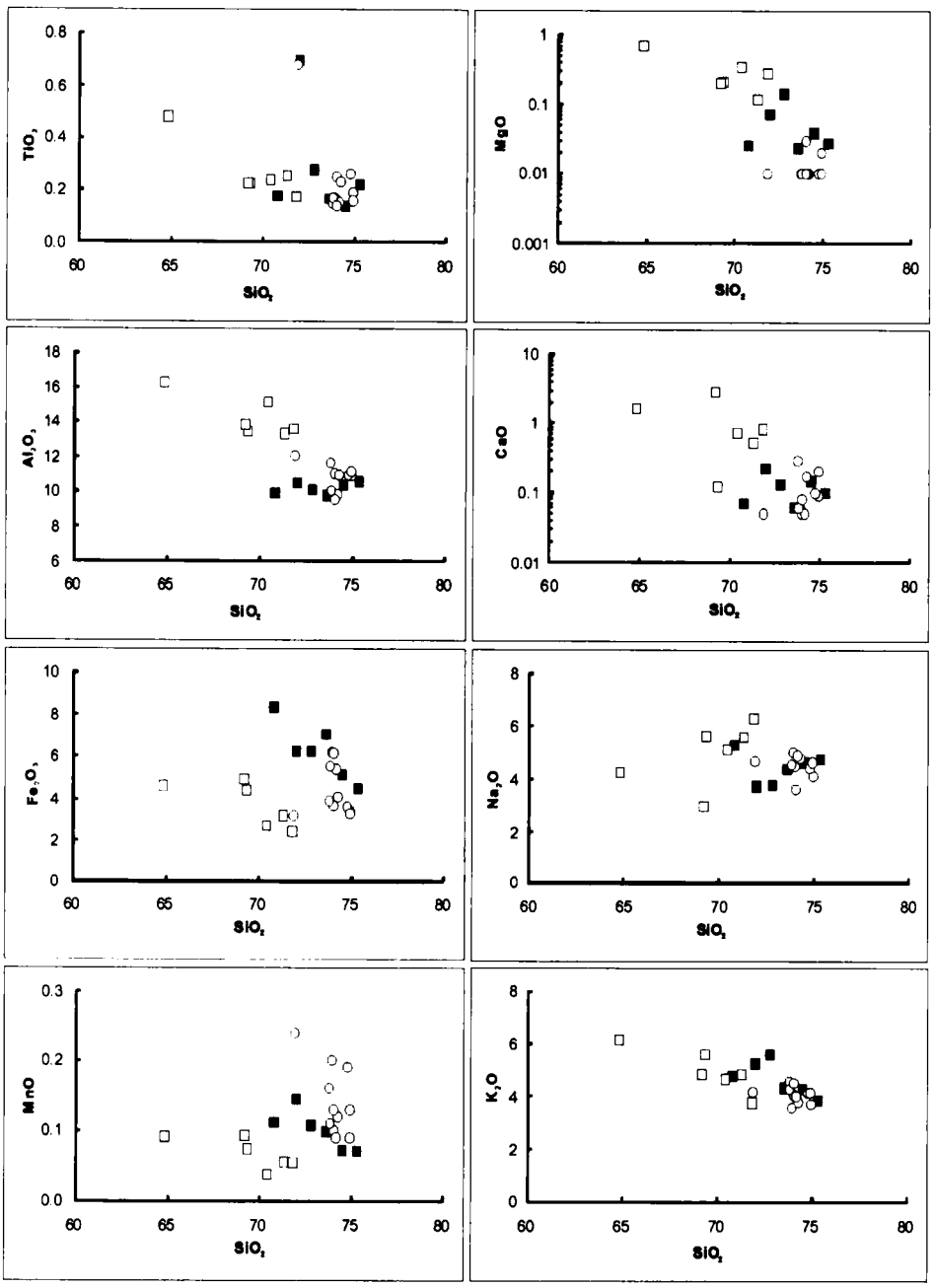


图 2 巴尔哲碱性花岗岩哈克图解

空心方块为非矿化碱性花岗岩; 实心方块为矿化碱性花岗岩; 空心园为矿化碱性花岗岩(数据引自王一先等,1997)

Fig. 2 Hark diagram for the Baerzhe alkaline granites

Open square show barren alkaline granite; solid square for mineralized alkaline granite; open sphere show mineralized alkaline granite (data from Wang *et al.*, 1997)

矿化碱性花岗岩中分散性元素镓更加富集,其(Ga/Al)×10^4大于6.75,显示了典型A型花岗岩的特征(Whalen *et al.*, 1987; 付建明等,2005)。

在矿化与非矿化碱性花岗岩中,铀的含量分别为$1.38\times10^{-6}\sim4.68\times10^{-6}$和$11.3\times10^{-6}\sim208\times10^{-6}$,而钍的含量则分别为$3.88\times10^{-6}\sim15.6\times10^{-6}$和$19.1\times10^{-6}\sim861\times10^{-6}$,虽然两类岩石中铀、钍含量差别较大,但U/Th均在相近的范围内变化(0.24~0.86和0.24~1.05),这在一定程度上反映二者有成因联系(图7a)。

5 讨论

5.1 矿化与非矿化碱性花岗岩的关系

已有的研究认为巴尔哲矿床稀有稀土元素有超常富集与硅化和钠长石化作用有密切的成因联系(王一先和赵振华,1997; 袁忠信等,2007)。本文的研究也显示,在矿化碱性花岗岩中石英和钠长石的含量均有显著的增加,并有交代成因钠长石存在。但岩相学证据并不支持矿化碱性花岗岩是

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

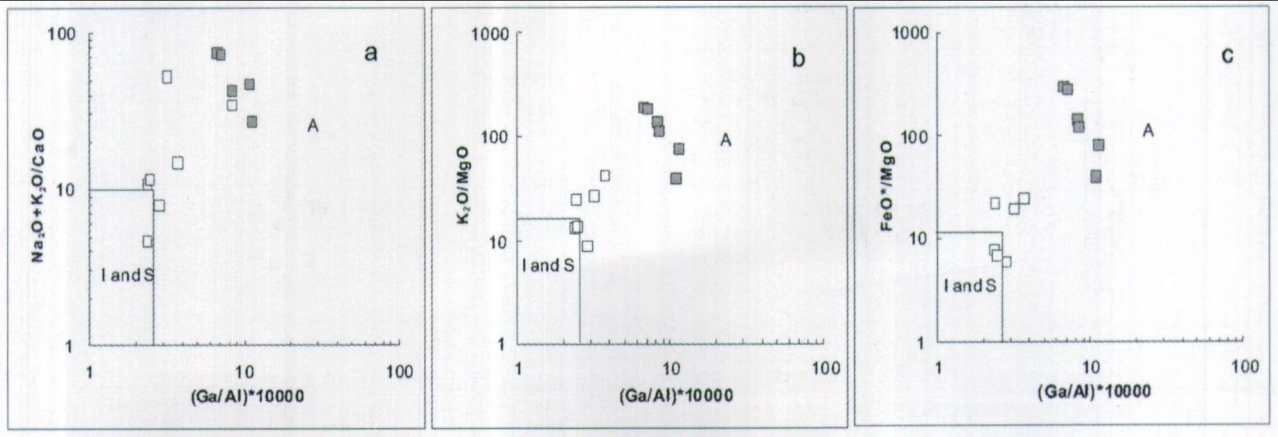


图 3 巴尔哲碱性花岗岩 Ga/Al vs $Na_2O + K_2O/CaO$，Ga/Al vs K_2O/MgO 及 Ga/Al vsFeO^*/MgO 图解

（据 Whalen *et al.*，1987）

空心方块为非矿化碱性花岗岩，实心方块为矿化碱性花岗岩

Fig. 3 Ga/Al vs $Na_2O + K_2O/CaO$, Ga/Al vs K_2O/MgO and Ga/Al vsFeO^*/MgO diagrams for the Baerzhe alkaline granites

(From Whalen *et al.*, 1987)

Open square show barren alkaline granites; solid square for mineralized alkaline granites

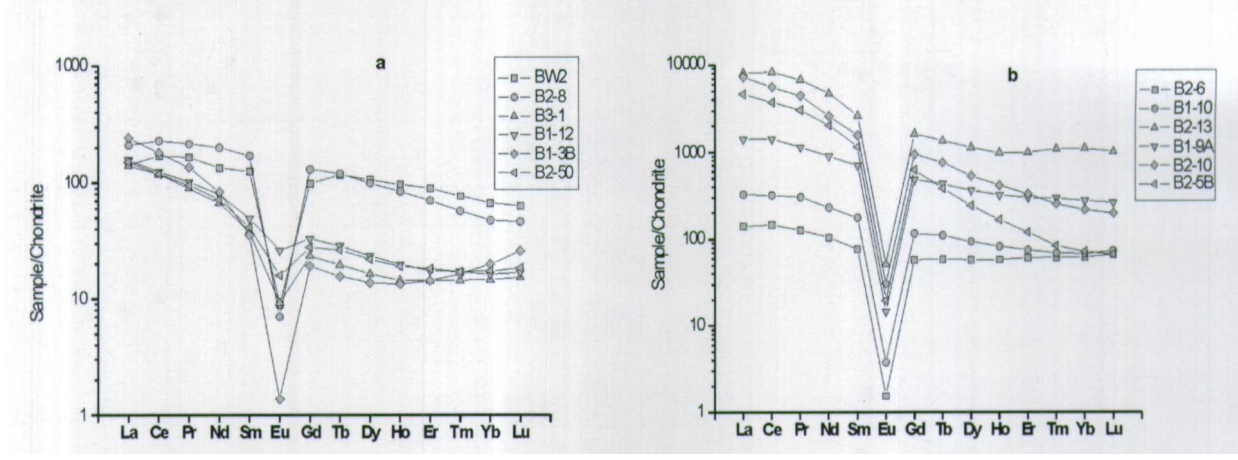


图 4 巴尔哲非矿化(a)与矿化(b)碱性花岗岩的稀土元素分布模式曲线

（球粒陨石标准化数据引自 Sun and McDonough，1989）

Fig. 4 REE distribution pattern for barren (a) and mineralized (b) Baerzhe alkaline granites

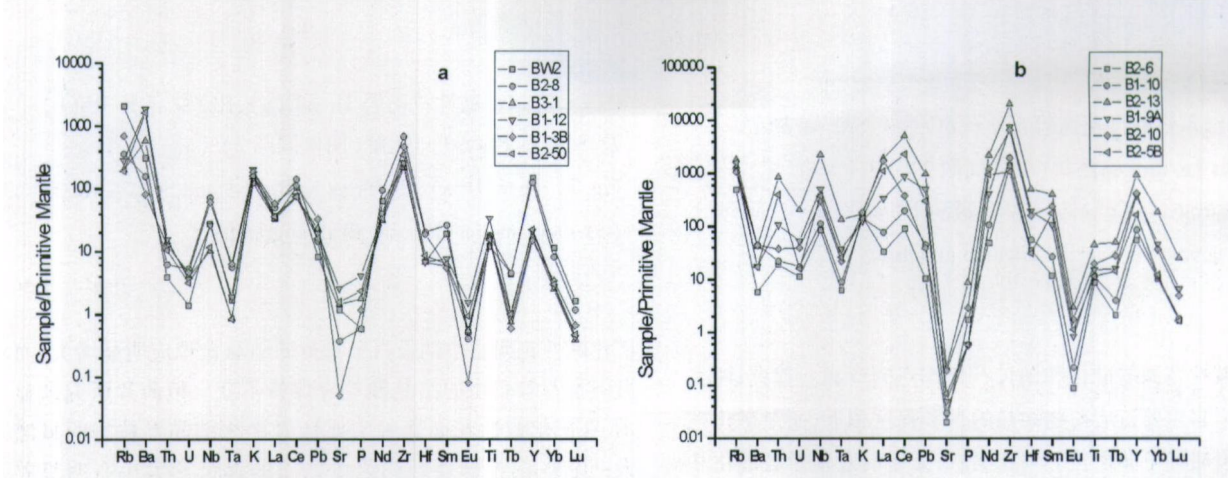


图 5 巴尔哲非矿化(a)与矿化(b)碱性花岗岩微量元素蛛网图（原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough，1989）

Fig. 5 Spidergram for barren (a) and mineralized (b) Baerzhe alkaline granites

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

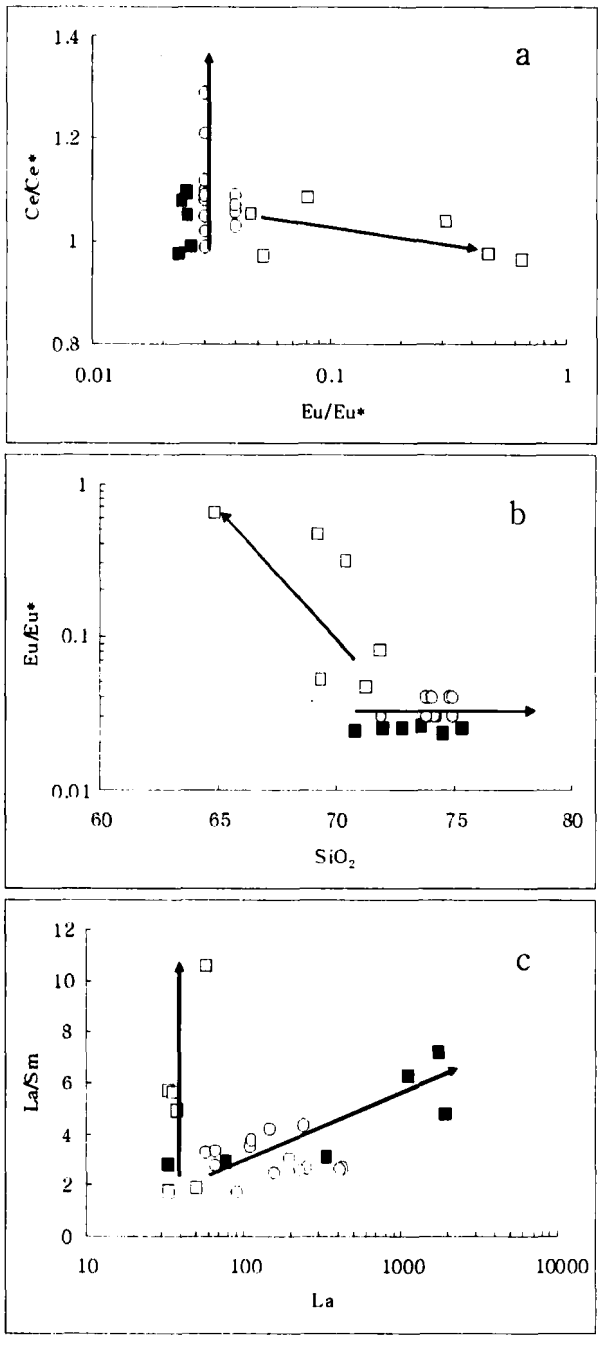


图 6 巴尔哲碱性花岗岩 δEu vs δCe(a)、SiO_2 vs δEu(b)及 La vs La/Sm(c)图解(图例同图 2)

Fig. 6 δEu vs δCe(a), SiO_2 vs δEu(b) and La vs La/Sm (c) diagrams for Baerzhe alkaline granites

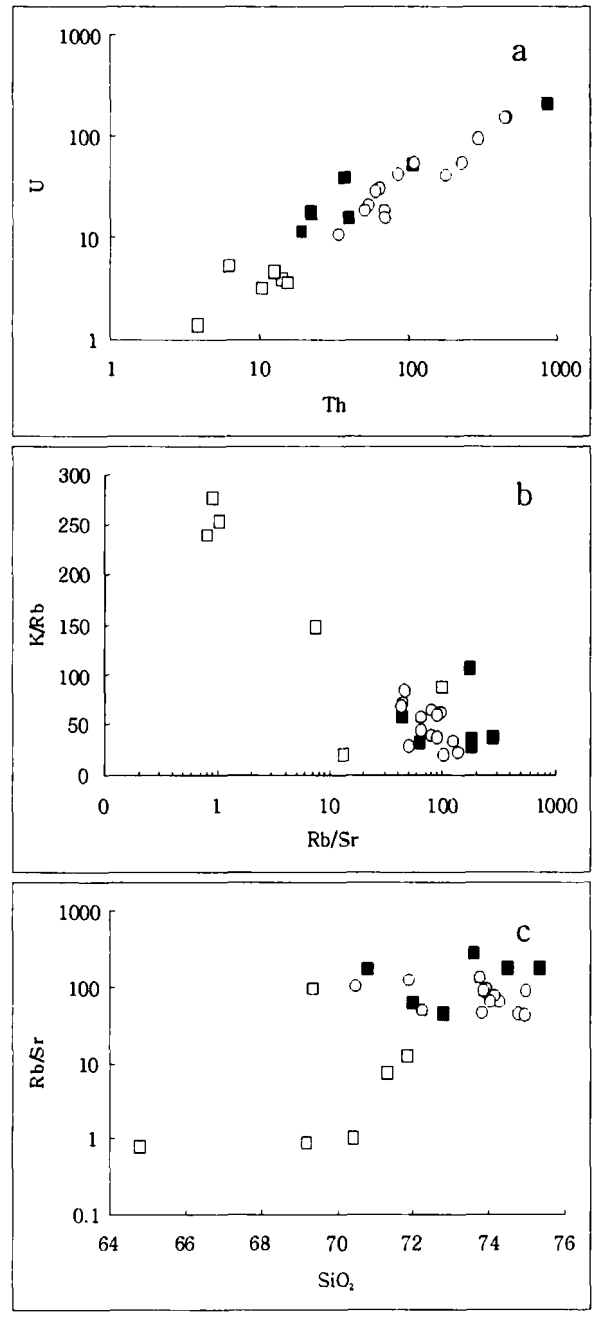


图 7 巴尔哲碱性花岗岩 Th vsU(a)、Rb/Sr vs K/Rb(b)及 SiO_2 vs Rb/Sr(c)图解(图例同图 2)

Fig. 7 Th vs U(a), Rb/Sr vs K/Rb(b) and SiO_2 vs Rb/Sr (c) diagrams for Baerzhe alkaline granites

非矿化碱性花岗岩硅化和钠长石化作用的产物。首先,两类碱性花岗岩主要造岩矿物结晶的自形程度相近,甚至矿化碱性花岗岩略好于非矿化碱性花岗岩,如果前者是后者硅化和钠长石化作用的产物,那么矿化碱性花岗岩的石英和钠长石的自形程度应低于非矿化碱性花岗岩。如果矿化碱性花岗岩是非矿化碱性花岗岩硅化和钠长石化作用的产物,那么在矿化碱性花岗岩中钠长石和石英的结晶颗粒应明显增大,而微斜长石等矿物的结晶颗粒应保持不变。但薄片研究却显示,在矿化碱性花岗岩中主要造岩矿物结晶颗粒均明显增大;其次,两类碱性花岗岩中锆石的晶型和大小有明显差异,而 CL 图像反映两类锆石内部结构也有明显区别,说明两类锆石在成因上并没有直接联系。

一系列地球化学特征也揭示两类岩石具有明显的差别,

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

矿化碱性花岗岩不可能是非矿化碱性花岗岩硅化和钠长石化的产物。两类岩石不仅 Ga/Al 不同，而且 $Na_2O + K_2O$/CaO、FeO*/MgO 和 K_2O/MgO 也有明显差别，在(Ga/Al) × 10^4 vs ($Na_2O + K_2O$)/CaO、(Ga/Al) × 10^4 vs FeO*/MgO 和 (Ga/Al) × 10^4 vs K_2O/MgO 图解上它们的投影点明显分成两个区(图3)。在 δEu vs δCe 图解上，矿化碱性花岗岩 δCe 的变化与 δEu 无明显的相关性，而非矿化碱性花岗岩 δCe 随 δEu 增大而减小(图6a)，二者表现出不同的演化规律；在 SiO_2 vs δEu 图解上矿化与非矿化碱性花岗岩也表现出不同的变化特征(图6b)。在矿化碱性花岗岩中 La/Sm 比值变化范围较大，且与 La 含量变化无明显相关性(图6c)；在非矿化碱性花岗岩中虽然 La/Sm 比值也在很大范围内变化，但它与 La 含量变化明显相关(图6c)。

无论是岩相学、还是地球化学的研究结果均显示，巴尔哲矿化与非矿化碱性花岗岩应是两种不同岩浆结晶的产物，它们之间是否存在着内在成因联系？已有的研究显示，矿化碱性花岗岩分布在非矿化碱性花岗岩体的上部(袁忠信等，2007)，两类岩石在空间上具有明显的藕合关系。两类岩石是否是同一岩浆体系不同演化阶段熔体结晶的产物？矿化与非矿化碱性花岗岩在 SiO_2 含量、$Na_2O + K_2O$/CaO、FeO*/MgO 和 K_2O/MgO 等地球化学参数差异支持这一假设。某些元素对，特别是微量元素对比值可以为确定岩浆分异、演化程度提供重要的信息。随着岩浆分异作用的加强，铷含量明显富集，K/Rb 值明显降低。在巴尔哲矿床，矿化碱性花岗岩的 K/Rb 明显低于非矿化碱性花岗岩(图7b)，说明矿化碱性花岗岩的演化程度明显高于非矿化的碱性花岗岩。与铷相反，锶主要在岩浆早期富集，因此随着岩浆分异、演化，岩石的 Rb/Sr 比值增大。在巴尔哲稀有稀土矿床中非矿化碱性花岗岩锶含量明显高于矿化碱性花岗岩(表1)，随着 SiO_2 含量的增加，Rb/Sr 值逐渐增大(图7c)，且矿化碱性花岗岩的 Rb/Sr 明显大于非矿化碱性型化岗岩(图7c)，这也说明矿化碱性花岗岩的分异、演化程度明显高于非矿化碱性花岗岩。在岩浆体系中 Eu 的亏损程度也是指示岩浆分异、演化程度的重要地球化学参数，随着岩浆分异作用的增强，Eu 的亏损程度也相应增大。巴尔哲矿床矿化碱性花岗岩 Eu 的亏损程度明显大于非矿化碱性花岗岩(图6a、b)，也说明矿化碱性花岗岩的分异、演化程度高于非矿化碱性花岗岩。

地球化学研究显示，巴尔哲矿化与非矿碱性花岗岩是同一岩浆体系不同演化阶段熔体固结的产物，矿化碱性花岗岩的演化程度明显高非矿化碱性花岗岩。Audetat 等(2003)和 Bakker 等(2006)研究显示，高演化岩浆和流体更趋于在高的结构带定位，这为解释巴尔哲地区矿化与非矿化碱性花岗岩空间分布特征提供了理论依据。

5.2 巴尔哲超大型稀有稀土矿床的形成机制

岩相学及地球化学特征均显示，巴尔哲稀有稀土矿床的形成与高演化 A 型花岗质岩浆密切相关。高演化岩浆的组成特征、物理化学状态及稀有稀土元素的富集方式如何是本文所关注的另一个焦点。伟晶岩和晶洞出现是岩浆体系进入到岩浆-热液过渡阶段的岩相学标志(Bakker and Elburg，2006)。在巴尔哲矿体内(矿化碱性花岗岩体)内分布着数量众多晶洞，并在其顶部出现了伟晶岩壳，说明矿化碱性花岗岩形成与岩浆-热液阶段有关。

许多学者对稀土四分组效应进行了研究(Masuda *et al.*，1987；Kawabe *et al.*，Hidaka *et al.*，1992；Irber，1992；1999；Zhao *et al.*，1992；Akagi *et al.* 1993；McLennan，1994；Bau，1996；Takahashi *et al.*，2002；Zhao *et al.*，2002；Liu and Zhang，2005)。花岗质岩浆高程度结晶分离作用导致残余熔体富 F、H_2O 和 Cl 等挥发分，形成流体 + 熔体共存的过渡体系，发生强烈的流体/熔体相互作用，呈现 M 型稀土四分组效应(Zhao *et al.*，1992)。Bau (1996)认为具有稀土四分组效应的系统明显偏离 Y/Ho、Zr/Hf 球粒陨石比值，明显受高演化的富挥发分岩浆的制约；Irber(1999)认为稀土四分组效应的出现表明岩浆体系已经进入了类似水流体系统(aqueous-like fluid system)。因此稀土 M 型四分组效应的存在也说明矿化碱性花岗岩原始熔体明显富流体。巴尔哲矿化碱性花岗岩岩体稀土元素表现为明显的 M 型四分组效应(王一先和赵振华，1997)，说明矿化碱性花岗岩原始岩浆是富含挥发分(主要是水)的熔体。

巴尔哲矿化碱性花岗岩 $\Delta^{18}O_{石英-长石}$ 为 10.40‰ ~ 14.58‰(袁忠信等，2003)，显著大于岩浆结晶分离的同位素分馏值(1.0‰ ~ 1.5‰)。Jahn *et al.* (2001)认为该现象可能与演化晚期岩浆/流体反应有关，这也说明巴尔哲碱性花岗岩，特别是矿化碱性花岗岩的原始岩浆明显富含挥发分。矿化碱性花岗岩中交代成因钠长石显然与体系富含流体有关，是自交代作用的产物。

Audetat and Pettke(2003)利用熔融和流体包裹体对美国新墨西哥两个花岗岩体的岩浆-热液演化过程进行了深入探讨。他们的研究显示，稀有元素铯在高演化岩浆(岩浆-热液过渡阶段熔体)内得到超常富集，并且这种流体饱和或过饱和的高演化岩浆往往堆积在岩浆房的顶部。该研究明确了在花岗岩成矿体系中至少有一部分成矿元素并不是通过流体/岩石反应方式富集，而是通过岩浆演化方式最终富集在高演化岩浆中，这不但阐述了某些花岗岩体不同岩相带内某一元素含量产生较大差异的真正原因，而且还揭示了稀有元素在某些富碱花岗岩体顶部富集、甚至成矿的机制；在巴尔哲矿床富晶体-流体包裹体内普遍地分布着稀土碳酸盐矿物(牛贺才等，2008)，这一现象充分说明巴尔哲碱性花岗质岩浆演化到岩浆-热液过渡阶段体系内稀土元素已经达到足以形成独立稀土矿物的富集程度。

综上所述，巴尔哲矿床稀有稀土元素的富集并不是流体/岩石反应的产物，而是碱性花岗质岩浆高演化的产物，碱性花岗质岩浆演化到晚期形成了富含挥发分的残余岩浆，稀有稀土元素在富含挥发分的岩浆中高度富集。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6 结论

(1)岩相学、岩石化学及微量元素地球化学特征显示,巴尔哲矿化与非矿化碱性花岗岩是A型花岗质岩浆不同演阶段熔体固结的产物,前者的演化程度明显高于后者。

(2)地质及地球化学证据显示,巴尔哲超大型稀有稀土元素矿床的形成并不是岩浆活动晚期硅化和钠长石化交代作用的产物,而是岩浆-热液过渡阶段形成的富含挥发分熔体固结的产物,其稀有稀土元素的超常富集与碱性花岗质岩浆高演化过程密切相关。

致谢 在野外考察过程中得到吉林大学程立仁教授的热情帮助,在室内研究及分析测试过程中得到中国科学院广州地球化学研究所王一先研究员、白正华研究员、刘颖、胡光黔、孙彦敏及涂湘林等高级工程师热心指导与帮助,在此一并衷心的谢忱!

References

Akagi T, Shabani MB and Masuda A. 1993. Lanthanide tetrad effect in kimuraite [$CaY_2(CO_3)_4 6H_2O$]: Implication for a new geochemical index. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57:2899 - 2905

Audetat A and Pettke T. 2003. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: A melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA). Geochimica et Cosmochimica Acta, 67: 97 - 121

Bakker RJ and Elburg MA. 2006. A magmatic-hydrothermal transition in Arkaroola (northern Flinders Ranges, South Australia): From diopside-titanite pegmatites to hematite-quartz growth. Contributions to Mineralogy and Petrology, 152: 541 - 569

Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf and lanthanide tetrad effect. Contributions to Mineralogy and Petrology, 123: 323 - 333

Fu JM, Ma CQ, Xie CF *et al.* 2005. Ascertainment of the Jijiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings. Geochimica, 34:215 - 226(in Chinese with English abstract)

Hidaka H, Holliger P, Shimizu H and Masuda A. 1992. Lanthanide tetrad effect observed in the Oklo and ordinary uraninites and its application for their forming proccesses. Geochemical Journal, 26: 337 - 346

Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 489 - 508

Kamenetsk VS, Naumov VB, Davidson P, van Achterbergh E and Ryan CG. 2004. Immiscibility between silicate magmas and aqueous fluids: A melt inclusion pursuit into the magmatic-hydrothermal transition in the Omsukchan Granite (NE Russia). Chemical Geology, 210:73 - 90

Kawabe I. 1992. Lanthanide tetrad effect in the La^{3+} ionic radii and refined spin-pairing energy theory. Geochemical Journal, 25:31 - 44

Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, Martineau F, Zhao ZH and Wang YX. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. Lithos, 59: 171 - 198

Liu CQ and Zhang H. 2005. The lanthanide tetrad effect in apatite from the Altay No.3 pegmatite, Xinjiang, China: An intrinsic feature of the pegmatite magma. Chemical Geology, 214: 61 - 77

Masuda A, Kawakami O, Dohmoto Y and Takenaka T. 1987. Lanthanide tetrad effects in nature: Two mutually opposite types. W and M. Geochemical Journal, 21: 119 - 124

McLennan SM. 1994. Rare earth element geochemistry and the "tetrad" effect. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58:2025 - 2033

Niu HC, Shan Q, Luo Y *et al.* 2008. Study on the crystal-rich fluid inclusions from the Baerzhe superlarge rare elements and REE deposit. Acta Petrologica Sinica, 24: 2149 - 2154 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Oceanic Basins Geological Society London Special Publication. 42: 313 - 345

Takahashi Y, Yoshida H, Sato N, Hama K, Yusa Y and Shimizu N. 2002. W-and M-type tetrad effects in REE patterns for water-rock systems in the Tono uranium deposit, central Japan. Chemical Geology, 184:311 - 335

Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contrib. Mineral. Petrol., 95:407 - 419

Wang YX and Zhao ZH. 1997. Geochmistry and origin of the Baerzhe REE-Nb-Be-Zr superlarge deposit. Geochimica, 26: 24 - 35 (in Chinese with English abstract)

Wang X and Li WX. 2002. Typomorphism of the {211}-type zircon. Chinese Science Bulletin, 47(2):154 - 158

Yuan ZX, Zhang M and Wan DF. 2003. A discussion on the perogenesis of ^{18}O-low alkali grinate-A case study of Baerzhe alkali grinate in Inner Mongolia. Acta Petrologica et Mineralogica, 22: 119 - 124 (in Chinese with English abstract)

Zhao ZH, Masuda A and Shabani MB. 1992. REE tetrad effects in rare metal granite. Chinese Journal of Geochemistry, 12: 221 - 233

Zhao ZH, Xiong XL, Han XD, Wang YX, Wang Q, Bao ZW and Jahn BM. 2002. Controls on the REE tetrad effect in granites: Evidence from the Qianlishan and Baerzhe granites, China. Geochemical Journal, 36: 527 - 543

附中文参考文献

付建明,马昌前,谢才富等. 2005. 湖南金鸡岭铝质A型花岗岩的厘定及其构造环境. 地球化学, 34: 215 - 226

牛贺才,单强,罗勇等. 2008. 巴尔哲超大型稀有稀土矿床富晶体的流体包裹体初步研究. 岩石学报, 24: 2149 - 2154

王一先和赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铌铍锆矿床地球化学和成因. 地球化学, 26:24 - 35

袁忠信,张敏,万德芳. 2003. 低^{18}O碱性花岗岩成因讨论-以内蒙古巴尔哲碱性花岗岩为例. 岩石矿物学杂志, 22:119 - 124

袁忠信,白鸽,张宗清等. 2007. 稀有稀土矿床赋矿岩石的自交代现象及其意义. 见: 中国科学院地球化学研究所、中国科学院广州地球化学所编著《郭承基院士纪念文集》. 广州: 广东科技出版社: 66 - 70

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net