

巴尔哲碱性花岗岩锆石稀土微量元素、U-Pb 年龄及其成岩成矿指示*

丘志力¹ 梁冬云² 王艳芬^{1,2,3} 孙媛¹ 李榴芬¹

QIU ZhiLi¹, LIANG DongYun², WANG YanFen^{1, 2, 3}, SUN Yuan¹ and LI LiuFen¹

1. 中山大学地球科学系, 广州 510275

2. 广州有色金属研究院, 广州 510651

3. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 南京 210007

1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. Guangdong Institute of Nonferrous Meta, Guangzhou 510651, China

3. East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-Ferrous, Nanjing 210007, China

2013-01-01 收稿, 2014-01-02 改回.

Qiu ZL, Liang DY, Wang YF, Sun Y and Li LF. 2014. Zircon REE, trace element characteristics and U-Pb chronology in the Baerzhe alkaline granite: Implications to the petrological genesis and mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6):1757-1768

Abstract The Baerzhe alkaline granite bearing a supergiant REE-Nb-Be-Zr deposit locates in the middle of the Xing'an-Mongolia orogenic belt of Northeast China. Using cathodoluminescence, electron microprobe and LA-ICP-MS analysis, nineteen grains of light-colored zircon and the dark-colored zircon from the East body (ore body) of the Baerzhe alkaline granite have been tested in this paper, and the relationship between petrological genesis and mineralization were discussed. The two types' zircons of the light-colored zircon and the dark-colored zircon crystals present different CL characteristics. For the former, wide discontinuous oscillatory zoning can be present, and the core-mantle zoning zircon also can be found in some grains; The latter has more developed dissolution structures at its rim or internal pits and cracks than the former, indicating that the involvement of fluids in the formation of the dark-colored zircon is more obvious. Both two types of zircon are rich in Nb, U, Y and REE, but the dark-colored zircon has higher Fe content. The type I of Light-colored zircon has the features of LREE enrichment, clear HREE differentiation, high Hf, Nb, Ta content and the low Y content; The type II of Light-colored zircon is poor in LREE with unobvious HREE differentiation, and its REE chondrite distribution pattern have obvious "M-type" tetrad effect, indicating that zircon crystallized in melt-fluid system. The primary region of dark-colored zircon shows similar REE patterns to the type II of Light-colored zircon with LREE poor and unobvious HREE differentiation. The Σ REE of altered part has no significant changes, but its LREE and Nb, Ta, U, Th content and Th/U ratio decreased. Both types have nearly the same $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age and the calculated age is 122.7 ± 1.8 Ma (MSWD = 5.1), similar to the previous data by Rb-Sr and U-Pb isotope analyses. The above-mentioned results show that Baerzhe syn-minerogenic zircon has the characteristics of mantle source. The enrichment and metasomatism of the source and fractional crystallization of the melt with aqueous hydrothermal fluids rich in F and Cl resulted in the enrichment of metallogenic element of rare and rare-earth metal leading to the formation of supergiant deposit.

Key words Zircons; REE and Trace Element; U-Pb chronology; Petrological genesis and mineralization; Baerzhe alkaline granite

摘要 巴尔哲碱性花岗岩体是分布在我国东北兴蒙造山带中段的罕见超大型稀土-铌-铍-锆矿床。本文通过对碱性花岗岩东岩体(矿体)成矿期有关深色和浅色锆石进行阴极发光、电子探针成分和 LA-ICP-MS 的分析测试,利用锆石地球化学特征探讨了岩体成岩成矿作用的关系。岩体的锆石可分为浅色和深色两类,两类锆石阴极发光具有不同特征,浅色锆石可见较宽不连续振荡环带,部分锆石存在核幔分区;和浅色锆石相比,深色锆石边部或内部凹坑、裂纹处溶蚀结构更发育。两类锆石均富含 Nb、U、Y 和 REE 元素,但深色锆石具有更高的 Fe 含量。I 型浅色锆石轻稀土富集,重稀土分异明显,具有高 Hf、Nb、

* 本文受国家自然科学基金项目(40073021)和广东省科技计划项目(2007A050100030)联合资助。

第一作者简介: 丘志力,男,1963 年生,博士,教授,岩石地球化学专业, E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

Ta, 低 Y 特征, II 型浅色锆石轻稀土亏损, 重稀土分异不明显, 其稀土元素球粒陨石分布模式具有明显的“M 型”四分组效应, 显示出熔体-流体结晶锆石的特征。深色锆石原生结晶部分稀土配分模式与浅色锆石 II 型相似, 轻稀土亏损, 重稀土分异不明显, 受流体改造部分 Σ REE 无明显变化, 但 LREE 和 Nb、Ta、U、Th 含量及 Th/U 比值降低。浅色锆石和深色锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相近, 获得锆石 U-Pb 的结晶年龄为 $122.7 \pm 1.8\text{Ma}$ (MSWD = 5.1), 与前人用 Rb-Sr 法及 U-Pb 法测定的年龄值一致; 上述结果显示, 巴尔哲岩体成矿期锆石具有慢源花岗岩来源特征, 大型稀有稀土金属成矿物质的富集可能和源区经历的近期富集交代及岩体在富含 F、Cl 等挥发分流体-水环境下作用下经历分离结晶两个因素叠加有关。可以认为, 巴尔哲富稀土花岗岩成岩与成矿作用是近于同时完成的。

关键词 巴尔哲碱性花岗岩; 锆石; 稀土及微量元素; U-Pb 年代学; 成岩成矿指示

中图分类号 P578.941; P597.3

1 引言

碱性花岗岩的物质来源、同位素特征、岩石成因及其与构造环境的关系是近二十年岩石学研究的热点问题之一 (Collins *et al.*, 1982; Eby, 1990, 1992; Windley, 1993; Poitrasson *et al.*, 1994, 1995; Wickham *et al.*, 1995, 1996; King *et al.*, 1996, 2001; Landenberger and Collins, 1996; Turner and Foden, 1996; Bonin *et al.*, 1998; Liégeois *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2002; Klimm *et al.*, 2008; El-Bialy and Streck, 2009; Jiang *et al.*, 2009)。我国东部碱性花岗岩的成因及物质来源已有相当多的学者进行过研究并提出了不同的成因观点 (顾连兴, 1990; 魏春生等, 2001; Wu *et al.*, 2002; 蔡剑辉等, 2004; 吴锁平等, 2007), 但对于碱性花岗岩成岩与稀有稀土金属的矿化关系的研究却相对较少 (林德松, 1994; 冯守忠, 2000; 曹志敏等, 2004; Zhao *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2008; 牛贺才等, 2008)。本文选择我国东部具有超大型稀土、铌、钽、锆矿化的内蒙巴尔哲碱性花岗岩体为研究对象, 通过对其成矿期锆石稀土微量元素及其 U-Pb 年龄的研究来探讨岩体成因及其矿化的关系。

2 内蒙巴尔哲碱性花岗岩及样品来源

巴尔哲碱性花岗岩体位于大兴安岭南缘内蒙古哲里木盟扎鲁特旗境内, 大地构造上位于兴蒙造山带中段, 岩体主要由两个花岗岩岩株及小量岩脉组成, 东、西两个岩体是矿区的主体; 区内主要的控岩控构造是北东向黄岗梁-甘珠尔庙-乌兰浩特断裂带, 区内火山和岩浆活动强烈, 岩石种类复杂多样, 岩性包括中基性的闪长岩、闪长斑岩, 中性至酸性、酸偏碱性钠闪石花岗岩等组成, 主要围岩为侏罗纪呼日格楞的碱性流纹质晶屑岩屑凝灰岩。

巴尔哲碱性花岗岩岩石地球化学特征前人已做过较为详细的工作 (王一先和赵振华, 1997; 冯守忠, 2000; Jahn *et al.*, 2001; 袁忠信等, 2003; 杨武斌等, 2009, 2011); 岩体与围岩间呈侵入接触关系, 东岩体主要组成矿物包括微斜长石、石英、钠长石、钠闪石、霓石、锆石及磁铁矿, 岩体钠闪石化、硅化蚀变强烈; 和东岩体相比, 西岩体的主要组成矿物条

纹长石更为特征, 晶洞发育; 巴尔哲碱性花岗岩全岩稀土元素配分具有明显的四分组效应 (王一先和赵振华, 1997; Jahn *et al.*, 2001), 同时巴尔哲碱性花岗岩还是一个明显亏损 ^{18}O 的花岗岩, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -5.61 , 是国内 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低的碱性花岗岩, 其中长石 ^{18}O 较石英的氧同位素亏损更加明显, 岩体和围岩具有相似的氧同位素组成 (Jahn *et al.*, 2001; 袁忠信等, 2003)。不同学者获得的全岩 Rb-Sr 等时线年龄基本一致, 变化在 $122 \pm 5\text{Ma} \sim 127.2\text{Ma}$, 岩体初始的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 $0.703 \sim 0.7071$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $+1.88 \sim +2.40$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) + 1.9 \sim +2.5$ (王一先和赵振华, 1997; Jahn *et al.*, 2001; 袁忠信等, 2003)。

本文样品选自巴尔哲碱性花岗岩东岩体 (矿体) 从地表到深部的混合样, 样品破碎粒度 $< 0.32\text{mm}$ 。经显微镜观察、电子探针分析及 X 射线衍射分析, 确定该混合样的主要矿物包括微斜长石、石英、钠长石、钠闪石、霓石、锆石、独居石、锰铈铁矿、氟碳铈矿、氟碳钽矿、兴安石、锌日光榴石、磁铁矿、锰钛铁矿、钽石、锡石等, 和前人研究一致。锆石的分选工作在广州有色金属研究院选矿工程研究所完成, 混合样进行重选-磁选及人工淘洗, 烘干后在双目镜下挑纯。选出的锆石大的可达到 0.3mm , 小者 0.01mm , 玻璃光泽, 透明-半透明, 颜色有无色、浅黄色、红色、红褐色。锆石晶型复杂, 部分呈不规则粒状集合体产出。具完整晶型者以锥面较柱面发育者居多, 呈双锥状和短柱状, 和碱性花岗岩中锆石形态的标型特征一致。大致可分为深色和浅色两种类型, 深色锆石和浅色锆石的晶型类似, 晶体呈自形-半自形, 锥面均主要发育 $\{101\}$, 柱面主要发育 $\{100\}$, 但后者自形程度较前者高。浅色锆石 (样品 BEZ1) 长约 $150 \sim 300\mu\text{m}$, 长宽比约为 $1 \sim 2$ 。深色锆石 (BEZ2) 长约 $140 \sim 330\mu\text{m}$, 长宽比约 $1.1 \sim 2.4$ 。

3 测试方法

将分选出来的锆石按照可以观察其最大表面积晶面的原则固定在环氧树脂上, 做成薄圆柱状样品靶, 放入恒温箱中冷却 5h, 先后用不同型号的砂纸和磨料粗磨, 细磨去锆石大约 $1/3$, 使样品柱上全部锆石均有较好的观察面, 最后进行仔细抛光。

锆石的电子探针分析在南京大学内生金属矿床成矿机

表 1 两类锆石电子探针成分分析 (wt%)

Table 1 The element compositions (wt%) of two types zircons of Baerzhe alkaline granite by EPMA

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
锆石类型	浅色锆石										深色锆石									
SiO ₂	32.8	33.1	33.6	33.9	34.2	33.5	33.7	33.8	33.9	34.5	33.3	33.9	34	33.6	32.7	33.6	33.8	33.5	33.3	33.2
CaO	0.02	-	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.01	0.16	0.05	0.09	0.08	0.07	0.09	0.07	0.07	0.1	0.05	0.03
TiO ₂	0.02	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.23	0.24	0.26	0.2	0.19	0.23	0.17	0.14	0.27	0.08	0.04
FeO	-	0.02	-	-	0.01	0.06	-	0.02	0.09	0.25	0.31	0.3	0.18	0.18	0.2	0.22	0.32	0.31	0.16	-
MnO	0.03	0.01	0.01	-	0.03	0.04	0.01	0.07	0.01	0.09	0.11	0.14	0.05	0.13	0.08	0.07	-	0.14	-	-
MgO	-	-	0.03	0.01	-	-	-	0.01	0.01	0.03	-	-	-	-	0.01	-	0.02	-	0.02	0.05
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	0.01	0.01	0	-	-	0.19	0.2	0.23	0.19	0.23	0.12	0.17	0.1	0.29	0.08	-
P ₂ O ₅	0.08	-	0.02	0.02	0	-	0.05	-	-	0	-	-	-	0.01	-	0.04	-	-	-	0.05
Nb ₂ O ₅	0.17	-	0.1	0.2	0.17	0.29	0.4	0.21	0.29	0.23	0.23	0.24	0.22	0.2	0.27	0.22	0.29	0.25	0.51	0.31
Ta ₂ O ₅	0.22	-	-	0.09	0.08	-	0.02	-	-	-	-	-	0.06	-	-	-	0.03	0.01	-	-
ZrO ₂	54.6	53.1	58.2	57.5	57.6	57.2	58	56.5	58	55.7	56.2	56.5	54.7	56.4	56.5	55.6	55.2	57	56.6	58.2
HfO ₂	1.28	0.93	1.16	1.29	1.52	1.12	1.37	1.02	1.08	0.96	1.01	1.14	1.17	1.27	1.09	1.07	1.01	1.3	1.11	1.52
ZrO ₂ /HfO ₂	42.6	57.4	50.1	44.5	37.9	51	42.3	55.6	53.8	57.8	55.8	49.6	46.6	44.5	51.9	51.9	54.8	43.9	51.2	38.2
Y ₂ O ₃	7.09	8.05	3.6	3.8	3.57	3.8	3.62	4.57	3.06	3.17	3.5	3.26	4.04	4.09	4.48	4.96	4.31	3.42	4.16	3.66
ThO ₂	0.44	0.25	0.26	0.05	0.3	0.17	0.11	0.01	0.1	0.03	0.01	0.05	0.03	-	-	0.04	0.2	0.03	0.03	0.21
UO ₂	0.51	0.25	0.29	0.29	0.21	0.28	0.22	0.31	0.2	0.25	0.16	0.13	0.24	0.3	0.26	0.4	0.38	0.34	0.26	0.31
Ce ₂ O ₃	0.12	0.07	0.15	0.21	0.15	0.24	0.28	0.11	0.24	0.46	0.42	0.56	0.13	0.12	0.59	0.46	0.23	-	0.27	0.33
Tm ₂ O ₃	0.06	0.07	0.04	-	0.06	0.11	-	0.07	0.05	0.01	0.07	0.04	0.16	0.09	-	0.09	0.2	0.04	-	0.07
Yb ₂ O ₃	0.27	0.39	0.46	0.47	0.43	0.32	0.41	0.59	0.58	0.46	0.61	0.31	0.75	0.69	0.75	0.61	0.77	1.09	0.33	0.46
Er ₂ O ₃	0.49	0.51	0.22	0.21	0.44	0.43	0.39	0.45	0.74	0.43	0.72	0.34	0.79	0.76	0.43	0.64	0.79	0.43	0.61	0.46
Ho ₂ O ₃	0.27	-	0.01	0.22	0.09	0.16	0.33	-	0.76	-	0.27	-	0.4	-	-	-	0.38	-	0.95	0.14
Dy ₂ O ₃	0.65	1.01	0.26	0.52	0.44	0.45	0.4	0.41	0.64	0.46	0.46	0.28	0.49	0.62	0.58	0.16	1.03	0.27	0.76	0.45
Lu ₂ O ₃	0.48	0.46	0.3	0.36	0.5	0.71	0.12	0.12	0.11	0.47	0.41	0.35	0.41	0.18	0.66	0.22	0.53	0.45	0.33	0.51
ΣRE ₂ O ₃	2.34	2.51	1.45	1.97	2.11	2.4	1.93	1.74	3.11	2.29	2.95	1.88	3.13	2.44	3.01	2.18	3.94	2.28	3.24	2.41
Total	99.5	98.3	98.8	99.1	99.8	98.9	99.5	98.4	99.9	98.1	98.3	98.2	98.3	99.0	99.1	98.9	99.8	99.3	99.6	100

制研究国家重点实验室完成。锆石的阴极发光照像和 LA-ICP-MS 微量元素分析和 U-Pb 定年分析均在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。

锆石的阴极发光测试仪器为日本 JEOL 公司的 JXA-8100。电子探针成分测试仪器为 JXA-8800M, 测试条件为: 电压 15kV, 束流电流 10nA, 探针直径 1 μ m。LA-ICP-MS 分析仪器为 Agilent7500a 等离子体质谱仪和 GeoLas Pro 激光剥蚀系统, 等离子体功率: 1350w; 激光波长: 193nm; 激光频率: 10Hz; 激光能量: 90mJ; 光斑直径: 1-11 号点为 32 μ m, 12-40 号点为 24 μ m, 每测试 5~7 个点进行两次 91500 标样校正; 微量元素含量计算以 NIST610 作外标, 以 Zr 作内标, 数据处理采用刘勇胜教授编写的 ICPMSDataCal 软件, 并用 91500 标准锆石作为外标进行元素和同位素分馏校正, 年龄计算采用 ISOPLOT 软件, 分析过程国际标准物质 NIST610 测试值与文献获得 NIST610 参考值在误差范围内一致 (Gao *et al.*, 2002)。

4 分析结果

锆石的阴极发光图像显示 (图 1), 两类锆石的阴极发光中等或较弱, 根据锆石阴极发光类型可以将锆石分为几种不

同类型: 可见明暗相间的自形振荡生长环带, 具岩浆成因特征的锆石; 中心到边部只呈现微弱的明暗变化 (图 1e-i) 锆石; 具有扇形分带结构 (图 1m) 和发育多个世代的锆石 (图 1n, o), 其中后者又可分为早世代 (核部) 和晚世代 (幔部), 生长均较自形, 且阴极发光强度无明显变化; 核幔边界较模糊, 核部和幔部晶面生长方向。锆石的边部或内部凹坑、裂纹处发育不同程度的溶蚀结构。和浅色锆石相比, 深色锆石主要以具有扇形分带结构的锆石为主, 部分锆石阴极发光很暗且无分带, 锆石的边部或内部凹坑、裂纹处溶蚀结构更发育, 常可见被交代部分穿插锆石的生长纹理, 锆石内部呈现出斑杂状结构和多孔状, 说明后者形成过程中流体的参与可能更为明显 (Rubatto and Gebauer, 2000)。

锆石电子探针分析结果显示, 两类锆石 ZrO₂ 含量明显偏低, 锆石的 HfO₂ 含量为 0.925%~1.524%, 锆石具有明显低的 Zr、Hf 元素; 两者均含有较高的 Nb、U、Y 和稀土元素, 其中浅色锆石 Nb 的含量变化于 0.10%~0.40% 之间, UO₂ 含量分布于 0.13%~0.51% 之间, Y₂O₃ 的含量主要分布于 3.06%~4.57% 之间 (两个分析点除外), ΣRE₂O₃ 变化于 1.45~3.13 之间; 深色锆石 Nb 的含量变化于 0.22%~0.51% 之间, UO₂ 含量分布于 0.26%~0.40% 之间, Y₂O₃ 的含量分布于 3.42%~4.96% 之间, ΣRE₂O₃ 变化于 2.18%~

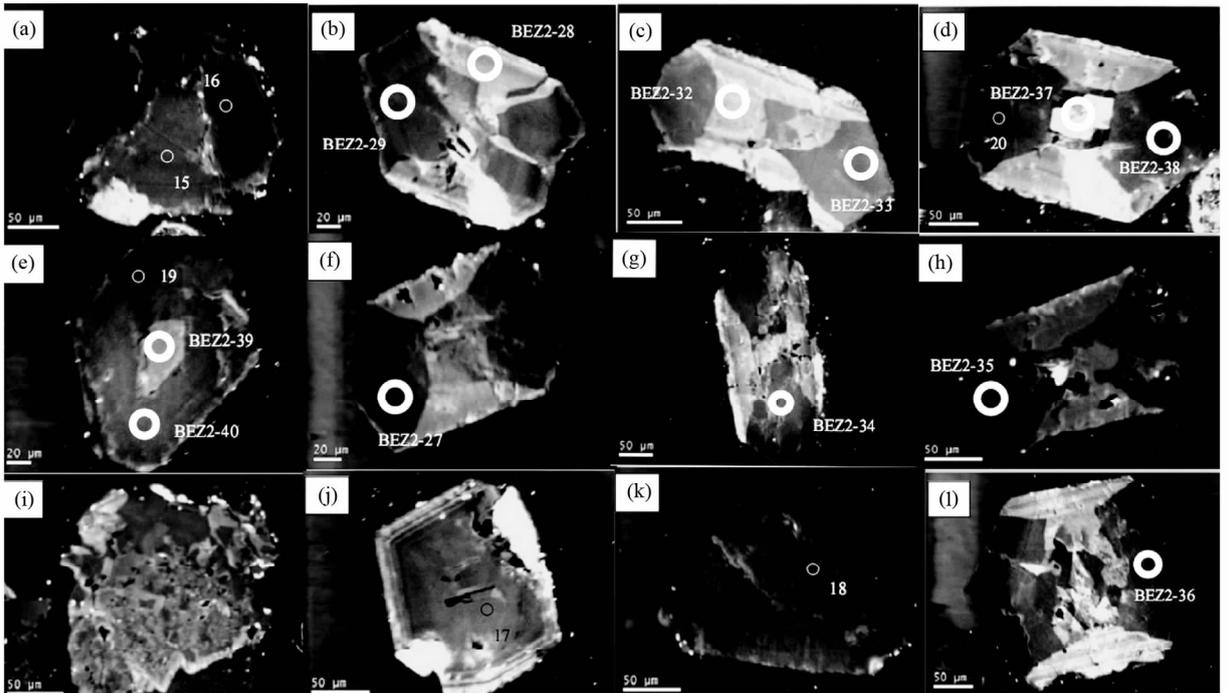
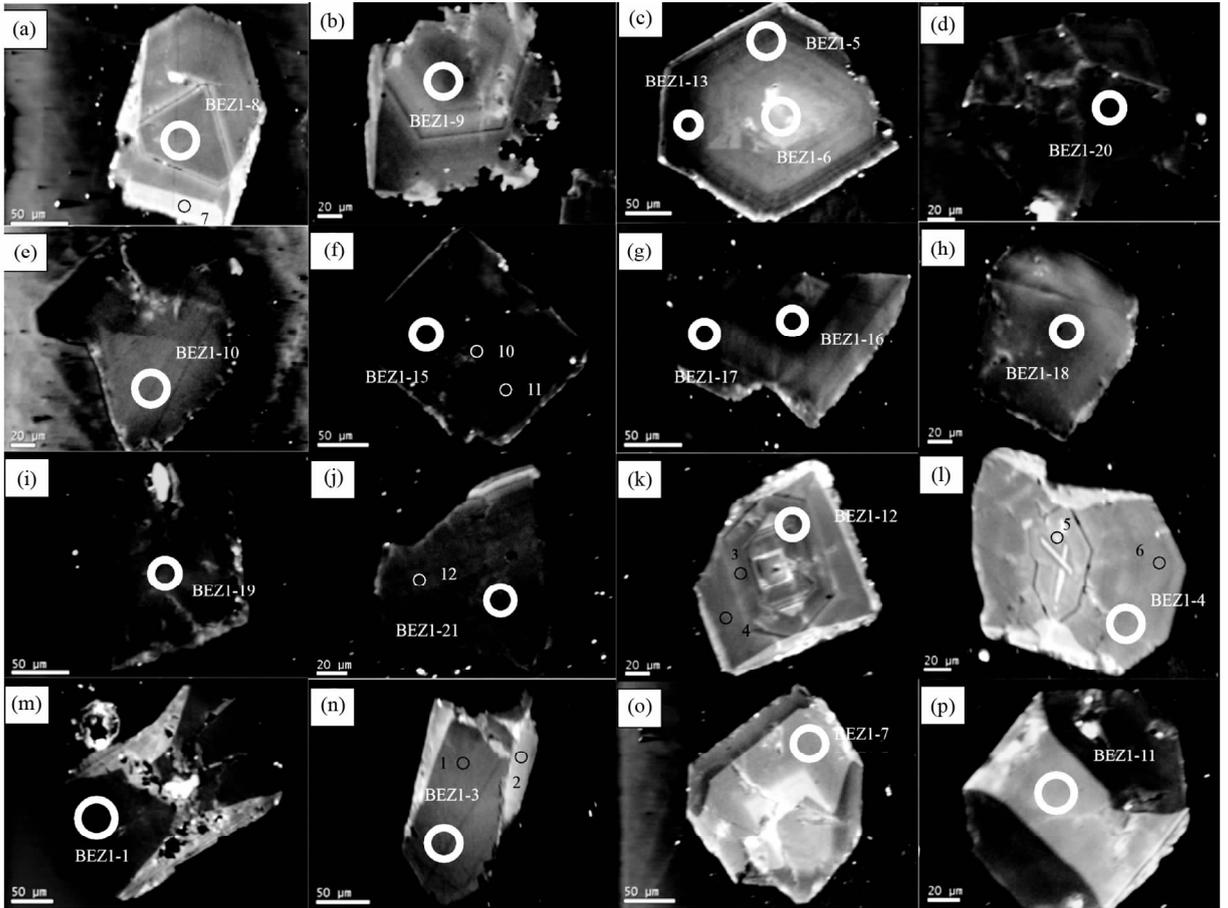


图1 巴尔哲碱性花岗岩锆石阴极发光图
左为浅色锆石;右为深色锆石. 圆圈为测试位置

Fig.1 CL images of zircons in Baerzhe granitic pluton

Left: the light-colored zircon; Right: the dark-colored zircon. Round pits are positions of laser analyses

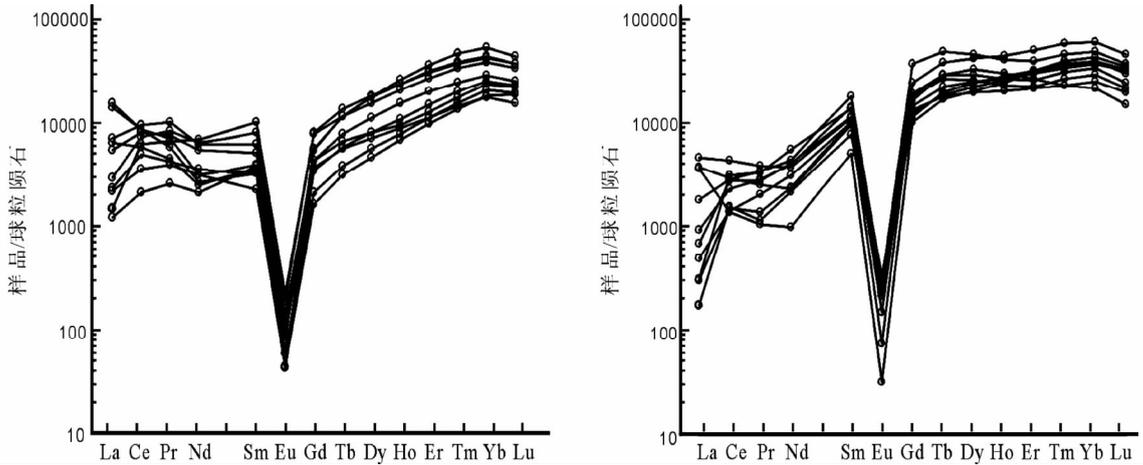


图2 浅色锆石的稀土配分模式图(左 I 型;右 II 型)

Fig.2 Chondrite-normalized REE abundance patterns of light zircons from Baerzhe alkaline granites (Left: type I; Right: type II)

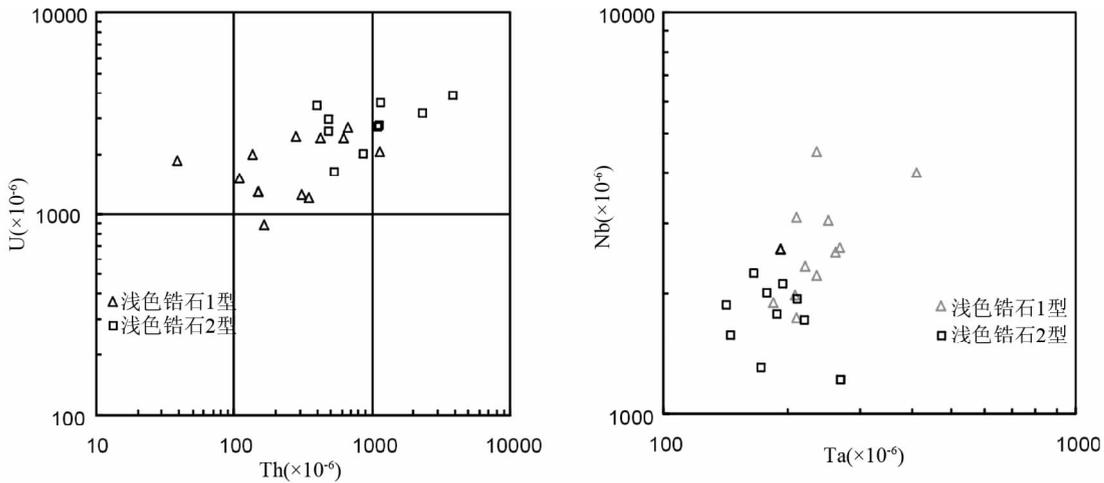


图3 I、II型浅色锆石的 Th、U 含量(左)和 Nb、Ta 含量(右)分布图

Fig.3 The distributive diagrams of Th vs. U (left) and Nb vs. Ta (right) of light color type I and II zircons in Baerzhe alkaline granites

3.94% 之间(表 1)。因此,均属于赋矿的锆石。不同的是,浅色锆石基本上不含 Fe 或者只含微量的 Fe,深色锆石的 Fe 含量为 0.16% ~ 0.32% (1 个除外),总体上明显高于浅色锆石。

对 19 颗浅色锆石共 22 个点进行了 LA-ICP-MS 微量元素测试(表 2),参考阴极发光特征,认为其中 19 个点具有原生结晶锆石特征,3 个点具有显示有流体改造特征。稀土配分模式显示,浅色锆石总体上可分为两种类型,一类(I 型)具有轻稀土富集,重稀土分异明显特征(图 2 左),其稀土总量变化于 $14035 \times 10^{-6} \sim 35731 \times 10^{-6}$ 之间,平均稀土总量为 24586×10^{-6} ,其 LREE/HREE 为 0.15 ~ 1.47, Yb/Sm 为 3.85 ~ 16.7, δEu 为 0.01 ~ 0.03; 另一类(II 型)具有轻稀土亏损,重稀土分异不明显特征(图 2 右)。其稀土总量变化于 $24666 \times 10^{-6} \sim 46264 \times 10^{-6}$ 之间,平均稀土总量为 31587×10^{-6} ,

LREE/HREE 为 0.13 ~ 0.38, Yb/Sm 主要变化于 2.03 ~ 9.26, δEu 为 0.01 ~ 0.03。

I 型浅色锆石 Th 含量主要变化于 $110 \times 10^{-6} \sim 663 \times 10^{-6}$, U 含量主要变化于 $894 \times 10^{-6} \sim 2391 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 比值除了一个数据为 0.55 (BEZ1-20) 以外,其余的主要分布于 0.11 ~ 0.29 之间,另外有三个分析点具有异常低的 Th/U 比值 (BEZ1-16, 0.07; BEZ1-17, 0.02; BEZ1-21, 0.07), $(\text{Sm}/\text{La})_N$: 0.16 ~ 6.73。II 型浅色锆石 10 个测点 Th 的含量总体上较第一种类型的高(图 3),其中 5 个分析点 (BEZ1-5, 6, 10, 11, 13) 的 Th 含量分布于 $402 \times 10^{-6} \sim 879 \times 10^{-6}$ 之间,其余 5 个分析点的 Th 含量则达到 $1010 \times 10^{-6} \sim 3903 \times 10^{-6}$, U 含量分布于 $1619 \times 10^{-6} \sim 3957 \times 10^{-6}$ 之间,无明显变化,10 个分析点的 Th/U 比值变化于 0.12 ~ 1.00, $(\text{Sm}/\text{La})_N$: 1.39 ~ 43.9。总体上, I 型浅色锆石的 Th 的含量、Th/U 比值和

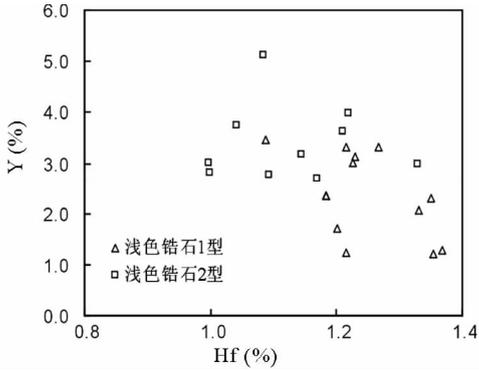


图4 浅色锆石的 Hf、Y 含量分布图

Fig. 4 The distributive diagrams of Hf vs. Y of light color type I and II zircons in Baerzhe alkaline granites

(Sm/La)_N 均低于于 II 型浅色锆石。

I 型浅色锆石的 Nb 含量分布于 1729 × 10⁻⁶ ~ 4517 × 10⁻⁶ 之间, Ta 含量分布于 184 × 10⁻⁶ ~ 411 × 10⁻⁶ 之间, Nb/Ta 比值变化为 8.21 ~ 19.2。II 型浅色锆石 Nb 含量分布于 1207 × 10⁻⁶ ~ 2223 × 10⁻⁶ 之间 (BEZ1-2 除外, 其 Nb 含量为 861.54 × 10⁻⁶), Ta 含量分布于 143 × 10⁻⁶ ~ 271 × 10⁻⁶ 之间, Nb/Ta 比值为 4.45 ~ 13.3。I 型浅色锆石的 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值高于 II 型浅色锆石 (图 3)。

另外, I 型浅色锆石 Hf 含量分布于 1.09% ~ 1.37% 之间, Y 含量分布于 1.21% ~ 3.46% 之间, Hf/Y 比值变化于 0.32 ~ 1.12 之间。II 型浅色锆石 Hf 含量分布于 0.96% ~ 1.33% 之间, Y 含量主要分布于 2.7% ~ 3.99% 之间, 总体上, I 型浅色锆石具有高 Hf 低 Y 特征而 II 型则具有低 Hf 高 Y 特征 (图 4)。

根据微量元素分析结果 (表 3), 参考阴极发光特征, 深色锆石也可分为原生结晶 I 型锆石和受流体的改造作用明显的 II 型锆石; 原生结晶部分 (深色 I 型) 的稀土配分模式 (图 5) 轻稀土亏损, 重稀土分异明显, 其稀土总量分布于 27062 × 10⁻⁶ ~ 33885 × 10⁻⁶ 之间, 平均稀土总量为 30844 × 10⁻⁶, 其分布模式明显不同于浅色锆石; LREE/HREE 为 0.11 ~ 0.44, Yb/Sm 为 2.13 ~ 8.34, δEu 为 0.02。Th/U 比值变化于 0.20 ~ 0.34, Nb/Ta 比值变化于 5.12 ~ 11.60, Hf/Y 比值变化于 0.26 ~ 0.41 之间, (Sm/La)_N 为 8.88 ~ 38.6。受流体改造锆石 (深色 II 型) 根据其阴极发光特征又可分为两种类型, 其一为灰色核部-白色边部类者 (测点号 BEZ2-28, BEZ2-29; BEZ2-32, BEZ2-33), 另一种是白色核部-灰色边部者, 两者稀土总量及 Eu 负异常特征和深色原生结晶 I 型相似, 但轻稀土 (LREE) 和 Nb、Ta、U、Th 含量及 Th/U 比值有所降低, LREE/HREE 为 0.08 ~ 0.44, Yb/Sm 为 1.87 ~ 10.8, (Sm/La)_N 为 0.82 ~ 4.49。

锆石的 U-Pb 同位素分析结果显示 (表 4), 数据在 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谱和图中不同程度沿水平方向偏离谱和线 (图 6), 根据较能准确反映年轻锆石结晶时间的 ²⁰⁶Pb/

表 3 巴尔哲碱性花岗岩深色锆石稀土及微量元素分析结果 (× 10⁻⁶)

Table 3 REE and trace element concentrations (× 10⁻⁶) of dark zircons in Baerzhe alkaline granite

测点号	BEZ2-27	BEZ2-29	BEZ2-33	BEZ2-34	BEZ2-35	BEZ2-36	BEZ2-38	
类型	深色 I 型							
CL 特征	暗色边部							
Sr	9.97	2.91	9.60	4.42	15.58	5.87	3.97	
Ba	259	76.7	298	117	452	176	98.9	
Sc	123	123	121	123	122	123	123	
Ga	3.12	1.30	3.61	1.41	5.80	2.07	1.41	
Pb	231	111	126	83.9	215	207	273	
Th	606	1000	1088	903	767	1193	3817	
U	3020	2943	3378	2759	3640	3601	3280	
Nb	1799	2101	2569	1535	2807	1700	2437	
Ta	201	238	285	283	242	332	243	
SiO ₂ (wt%)	36.9	34.7	36.0	37.9	38.2	37.9	40.0	
P ₂ O ₅ (wt%)	0.08	0.05	0.07	0.09	0.07	0.12	0.06	
TiO ₂ (wt%)	0.08	0.08	0.10	0.06	0.13	0.06	0.09	
Hf (wt%)	1.37	1.30	1.17	1.26	1.19	1.10	1.24	
Y (wt%)	4.61	3.14	4.08	4.13	4.48	4.25	3.06	
La	145	102	120	58.1	224	83.9	133	
Ce	1262	2342	1535	1224	1851	910	2217	
Pr	150	426	209	160	258	98.3	364	
Nd	1127	3328	1572	1383	1681	846	2830	
Sm	1104	2298	1525	1447	1283	1085	2232	
Eu	11.9	19.7	16.5	15.1	10.4	11.9	22.5	
Gd	2167	2675	2673	2421	2027	2404	3426	
Tb	691	640	787	703	643	774	828	
Dy	6308	4856	6770	5780	5970	6907	6152	
Ho	1757	1182	1757	1452	1738	1868	1452	
Er	6437	3875	6042	4742	6531	6380	4436	
Tm	1205	671	1086	827	1245	1112	711	
Yb	9207	4885	7780	6095	9262	7813	4883	
Lu	1180	603	922	756	1161	931	601	
ΣREE	32750	27904	32796	27062	33885	31222	30288	
LREE	3799	8516	4978	4288	5307	3035	7799	
HREE	28951	19388	27818	22775	28578	28187	22489	
LREE/HREE	0.13	0.44	0.18	0.19	0.19	0.11	0.35	
δEu	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
δCe	1.89	1.56	1.85	2.08	1.65	2.14	1.65	
Hf/Y	0.30	0.41	0.29	0.31	0.27	0.26	0.41	
Nb/Ta	8.95	8.84	9.02	5.42	11.6	5.12	10.0	
Th/U	0.20	0.34	0.32	0.33	0.21	0.33	1.16	
Yb/Sm	8.34	2.13	5.10	4.21	7.22	7.20	2.19	
(Sm/La) _N	11.8	34.8	19.6	38.6	8.88	20.0	25.9	
测点号	BEZ2-28	BEZ2-29	BEZ2-32	BEZ2-33	BEZ2-37	BEZ2-38	BEZ2-39	BEZ2-40
类型	深色 II 型							
CL 特征	白色边部	浅灰色边部	白色边部	灰色边部	白色核部	灰色边部	白色核部	灰色边部
Pb	67.8	111	184	126	547	273	442	455
Th	205	1000	568	1088	10540	3817	1982	726

续表 3

Continued Table 3

测点号	BEZ2 -28	BEZ2 -29	BEZ2 -32	BEZ2 -33	BEZ2 -37	BEZ2 -38	BEZ2 -39	BEZ2 -40
类型	深色 II 型							
CL 特征	白色 边部	浅灰色 边部	白色 边部	灰色 边部	白色 核部	灰色 边部	白色 核部	灰色 边部
U	1577	2943	2037	3378	2000	3280	3128	3009
Nb	1570	2101	1525	2569	1206	2437	2075	3412
Ta	160	238	193	285	223	243	173	200
Hf (wt%)	1.40	1.30	1.15	1.17	1.00	1.24	1.20	1.19
Y (wt%)	3.47	3.14	4.46	4.08	3.58	3.06	4.22	3.38
La	144	102	433	120	107	133	113	258
Ce	1754	2342	1418	1535	625	2217	1154	1640
Pr	261	426	157	209	52.4	364	206	341
Nd	1845	3328	920	1572	389	2830	1745	2220
Sm	1432	2298	935	1525	589	2232	2273	2056
Eu	13.6	19.7	11.4	16.5	9.16	22.5	31.3	22.0
Gd	2014	2675	2160	2673	1666	3426	5660	3806
Tb	552	640	730	787	594	828	1552	1027
Dy	4735	4856	7098	6770	5635	6152	11671	8037
Ho	1260	1182	2035	1757	1502	1452	2544	1846
Er	4549	3875	7099	6042	4987	4436	6439	5102
Tm	855	671	1327	1086	856	711	839	691
Yb	6659	4885	9709	7780	6376	4883	4617	3842
Lu	884	603	1181	922	811	601	443	366
ΣREE	26957	27904	35215	32796	24198	30288	39288	31252
LREE	5450	8516	3874	4978	1771	7799	5523	6537
HREE	21507	19388	31340	27818	22426	22489	33765	24715
LREE/ HREE	0.25	0.44	0.12	0.18	0.08	0.35	0.16	0.26
δEu	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
δCe	1.71	1.56	1.33	1.85	2.03	1.65	1.43	1.15
Hf/Y	0.40	0.41	0.26	0.29	0.28	0.41	0.28	0.35
Nb/Ta	9.80	8.84	7.89	9.02	5.40	10.0	12.0	17.1
Th/U	0.13	0.34	0.28	0.32	5.27	1.16	0.63	0.24
Yb/Sm	4.65	2.13	10.4	5.10	10.8	2.19	2.03	1.87
(Sm/La) _N	3.31	1.83	4.49	2.91	3.83	1.43	0.82	1.01

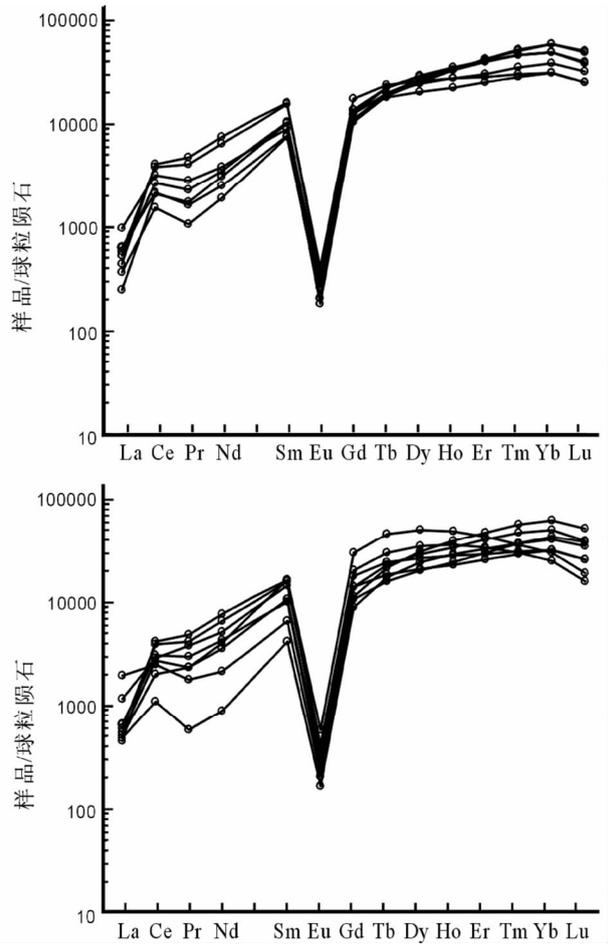


图5 深色锆石的稀土配分模式图(上: I型; 下: II型; 球粒陨石据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE abundance patterns of dark zircons in Baerzhe alkaline granites (Upper: type I; Lower: type II; chondrite after Sun and McDonough, 1989)

^{238}U 年龄计算, 浅色锆石 I $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要分布范围为 113 ~ 129Ma (BEZ1-8 除外, 为 139Ma), 浅色锆石 II 年龄分布于 116 ~ 126Ma 之间, 而深色锆石 I 年龄分布于 117 ~ 128Ma 之间。

5 讨论

5.1 浅色和深色锆石的成因及其与矿化的关系

本文研究的浅色和深色两类锆石的组成和锆石的理论组成相比 (ZrO_2 67.1%, SiO_2 32.9%), ZrO_2 含量明显偏低, 锆石具有明显低的 Zr、Hf 元素组成, $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ 比值变化于 37 ~ 59 之间, ZrO_2 与 HfO_2 含量呈正相关性, 大部分锆石以典型的双锥状为主, 具有幔源型花岗岩锆石的特征(汪相和

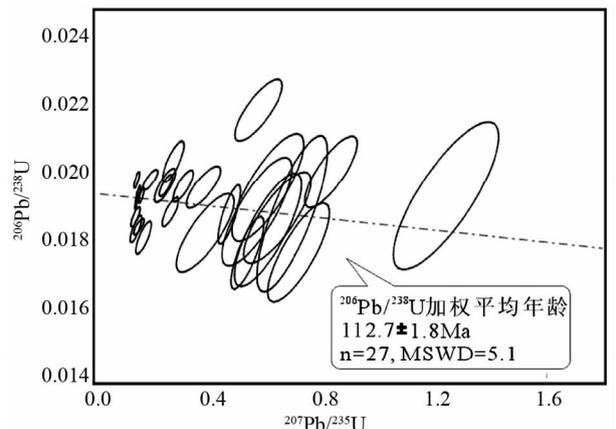


图6 锆石 U-Pb 协和图

Fig. 6 La-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagram

表4 巴尔哲碱性花岗岩锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 4 The U-Pb isotopic data of zircons in Baerzhe alkaline granite

序号	测点号	Pb (total) ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th U	同位素比值						年龄/校正 (Ma)	
						$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm \sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm \sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm \sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$
1	BEZ1-8	2069	347	1265	0.27	0.0000	0.0000	0.1427	0.3104	0.0191	0.0027	122	17
2	BEZ1-9	598	311	1299	0.24	0.0579	0.0097	0.1627	0.0259	0.0191	0.0003	122	2
3	BEZ1-12	706	144	774	0.19	0.0000	0.0000	0.1369	0.1376	0.0190	0.0011	122	7
4	BEZ1-14	443	216	2055	0.11	0.0369	0.0090	0.1096	0.0233	0.0191	0.0002	122	2
5	BEZ1-15	2032	378	2029	0.19	0.0000	0.0000	0.1281	0.2311	0.0192	0.0020	123	13
6	BEZ1-16	1049	93.2	1227	0.08	0.0000	0.0000	0.1307	0.0959	0.0195	0.0010	124	6
7	BEZ1-17	547	155	1578	0.10	0.0000	0.0000	0.1168	0.0620	0.0191	0.0005	122	3
8	BEZ1-20	465	846	1670	0.51	0.0450	0.0081	0.1255	0.0214	0.0191	0.0002	122	1
9	BEZ1-21	3421	114	1662	0.07	0.3361	0.3285	0.0940	0.2201	0.0193	0.0020	123	13
10	BEZ1-22	1026	512	1954	0.26	0.0000	0.0000	0.0267	0.0667	0.0189	0.0006	121	4
11	BEZ1-24	2005	611	2135	0.29	0.0000	0.0000	0.0927	0.1627	0.0192	0.0013	123	8
12	BEZ1-1	216	1143	3695	0.31	0.0483	0.0011	0.1283	0.0027	0.0192	0.0001	123	1
13	BEZ1-3	591	3791	4055	0.93	0.0487	0.0021	0.1301	0.0055	0.0192	0.0001	123	1
14	BEZ1-4	291	1131	2874	0.39	0.0534	0.0022	0.1396	0.0056	0.0189	0.0001	121	1
15	BEZ1-5	2325	479	3093	0.15	0.0452	0.0122	0.1189	0.0294	0.0180	0.0003	115	2
16	BEZ1-10	594	811	2085	0.39	0.0477	0.0087	0.1415	0.0231	0.0192	0.0002	123	1
17	BEZ1-13	3296	234	2695	0.09	0.2379	0.1957	0.1355	0.1757	0.0192	0.0015	123	10
18	BEZ1-18	787	1691	2533	0.67	0.0386	0.0119	0.1240	0.0290	0.0190	0.0003	122	2
19	BEZ1-19	1424	930	2185	0.43	0.0727	0.0231	0.2619	0.0888	0.0188	0.0010	120	6
20	BEZ2-27	885	508	3004	0.17	0.0398	0.0187	0.1580	0.0549	0.0191	0.0005	122	3
21	BEZ2-29	338	889	2730	0.33	0.0440	0.0049	0.1167	0.0130	0.0193	0.0002	123	1
22	BEZ2-33	374	937	3033	0.31	0.0514	0.0045	0.1335	0.0118	0.0188	0.0001	120	1
23	BEZ2-34	199	778	2460	0.32	0.0474	0.0026	0.1240	0.0066	0.0191	0.0002	122	1
24	BEZ2-35	783	667	3287	0.20	0.0447	0.0091	0.1289	0.0230	0.0191	0.0002	122	1
25	BEZ2-36	729	1029	3223	0.32	0.0280	0.0172	0.1434	0.0401	0.0191	0.0003	122	2
26	BEZ2-38	1024	3223	2916	1.11	0.0013	0.0204	0.1219	0.0606	0.0191	0.0005	122	3
27	BEZ2-40	2266	623	2652	0.23	0.0001	0.0428	0.1781	0.1212	0.0191	0.0010	122	6
28	BEZ1-6	2833	487	2660	0.18	0.0317	0.0256	0.1279	0.0667	0.0200	0.0005	127	3
29	BEZ1-7	340	147	1357	0.11	0.0472	0.0076	0.1283	0.0201	0.0190	0.0002	122	1
30	BEZ1-11	302	670	1677	0.40	0.0366	0.0115	0.1270	0.0357	0.0189	0.0004	120	2
31	BEZ2-28	224	165	1455	0.11	0.0310	0.0058	0.0839	0.0152	0.0192	0.0002	122	1
32	BEZ2-32	797	489	1827	0.27	0.0773	0.0132	0.2203	0.0334	0.0192	0.0004	122	2
33	BEZ2-37	2811	8940	1751	5.11	0.0000	0.0000	0.2826	0.1835	0.0200	0.0016	128	10
34	BEZ2-39	2220	1558	2586	0.60	0.0000	0.0000	0.0994	0.1952	0.0192	0.0017	122	10

注:1~27 为原生结晶点;其中:1~11 浅色锆石 I 型;12~19 浅色锆石 II 型;20~27 深色锆石 I 型;28~34 深色锆石 II 型

Pupin, 1992)。两类锆石的稀土总量变化于 1.4%~4.6% 之间,富含稀土元素,其中稀土配分模式与一般花岗岩和伟晶岩中的锆石类似 (Belousova *et al.*, 2002),也相似与前人研究的花岗岩类的锆石,锆石 δEu 分布于 0.01~0.03 之间,球粒陨石标准化稀土配分模式呈深“V”型,具显著的 Eu 负异常,指示锆石结晶时花岗质岩浆经历过高度的分异,结果和前人研究获得该岩体全岩及其它矿物的稀土组成均具有显著亏损特征具有明显的一致性 (Jahn *et al.*, 2001; Zhao *et al.*, 2002);但部分锆石轻稀土明显富集,和热液成因锆石特征一致 (Hoskin and Ireland, 2000; Corfu, 2003; Hoskin, 2005; 毕诗健等, 2008),说明锆石主要是在花岗岩或相关的熔体-流体体系中结晶的。

但锆石的阴极发光特征及稀土配分特征同时显示,两类锆石形成先后或者经历的过程仍然有所不同。从浅色锆石到深色锆石, ΣREE 、HREE 和 Y、Th、U 等微量元素含量呈渐

变增长趋势,说明浅色锆石较深色锆石在岩浆中结晶早; Ball-haus 等进行的 Fe、Ni、Cu、Pt、Au 等元素在流体相(饱和 Si-NaCl 的 C-H-O-S 流体)和硫化物相(掺有 Pt、Au 等金属)之间的分配实验(880~900°C、压力为 0.4~1GPa)显示,流体中 Fe 含量明显增高(转引自刘丛强等,2001),本文深色锆石 Fe 的含量明显高于浅色锆石,如果考虑其阴极发光特征较少显示岩浆锆石的典型特征和强钠长石化地段锆石高度富集的事实(王一先等,1997),可以认为深色锆石的形成可能和晚期岩体经历的流体和挥发分的交代蚀变作用关系更加密切。

在浅色锆石中,浅色锆石 I 的阴极发光特征以震荡环带为主,其 Th/U 比值主要分布于 0.11~0.29 之间,与火成锆石相似。Yb/Gd=3.96~9.18,重稀土分异程度较大,表现为一般花岗岩锆石的特征;而浅色锆石 II 则具有显著的“M”型稀土元素四分组效应,Yb/Gd=1.07~3.45,重稀土分异不明

显,具有流体-熔体共存体系结晶矿物特点。和浅色锆石 II 相比,浅色锆石 I 富轻稀土(LREE)、Nb、Ta,贫 Th、U、Y,其稀土总量(Σ REE)和重稀土(HREE)含量总体上低于前者,其 Th/U 比值也较低;同时, I 型浅色锆石具有高 Hf 低 Y 特征,和高温幔源型的花岗岩锆石一致,而 II 型则具有低 Hf 高 Y 特征。由于 Y 比 Hf, Th 比 U 具有更大的离子半径,前者比后者倾向于在岩浆晚期富集(汪相和 Pupin, 1992),这些特征均显示 II 型浅色锆石形成晚于 I 型浅色锆石。而较多的学者也认同,高度演化的花岗质岩浆晚期流体-熔体相互作用是花岗质岩浆稀土四分组效应形成的重要控制因素(赵振华等, 1992; Bau, 1996; Irber, 1999; Wu *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2002; 杨武斌等, 2009)。可以认为, II 型浅色锆石更可能形成于岩浆演化晚期流体-熔体共存体系环境,是流体-熔体相互作用的产物,这个结论和根据锆石 Ti 温度计计算获得 I 型、II 型浅色锆石和深色锆石 Ti 饱和温度依次下降的结果相一致。

显然,矿化锆石阴极发光图像及稀土和微量元素特征显示, I 型浅色锆石形成最早,是高度分异花岗质岩浆体系结晶产物,它们的成因和幔源花岗岩有关; II 型浅色锆石形成于岩浆演化晚期流体-熔体共存的体系,其中深色锆石的形成和流体交代作用关系更密切。

5.2 巴尔哲碱性花岗岩的成岩与成矿过程

巴尔哲岩体的造岩矿物中包裹有稀有稀土金属矿物的包体,说明岩浆冷却结晶阶段,稀有稀土金属矿物已有晶出,因此,有人认为成矿或早于岩浆结晶或与岩浆结晶同时进行(冯守忠, 2000)。但由于造岩矿物不是主要的赋矿矿物,上述的认识有待进一步证据的支持。

本文研究的锆石既是成岩副矿物也是主要的赋矿矿物之一,从早到晚以及岩浆结晶及和熔体-流体有关锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 $122.7 \pm 1.8\text{Ma}$,不同类型锆石在误差范围内一致,并且和前人利用 Rb-Sr 等时线获得的全岩年龄 $122 \pm 5\text{Ma} \sim 127.2\text{Ma}$ 非常一致(王一先等, 1997; Jahn *et al.*, 2001; 袁忠信等, 2003),充分显示出巴尔哲岩体侵位时间和赋矿锆石结晶时间不存在时差,或者说巴尔哲岩体的成岩和成矿是近于同时进行的,这一认识和根据矿床富晶流体包裹体研究获得的结论一致(牛贺才等, 2008; 杨武斌等, 2009)。

由于锆石是结构高度稳定的副矿物,其稀土微量元素及氧同位素组成不易受高温变质、热液蚀变的影响而发生变化(Watson and Cherniak, 1997; Monani and Valley, 2001; 蔡剑辉等, 2004),甚至即使经历过榴辉岩相高级变质作用,锆石仍能基本保存原岩氧同位素的特征(郑永飞等, 2003; Chen *et al.*, 2004),巴尔哲岩体锆石具有很大的负的 $\delta^{18}\text{O}$ ($-10.9\% \sim -10.6\%$)(袁忠信, 2003),显示锆石结晶时氧同位素亏损是花岗质熔体-流体具有的特征。巴尔哲花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.88 \sim +2.50$, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i < 0.705, 显示新生地

幔来源特征,但岩体的岩石的 $f_{(\text{Sm}/\text{Nd})} < 0$ (王一先等, 1997; Jahn *et al.*, 2001),显示出岩浆曾经历了近期的富集事件,这种近期事件可能是该岩体氧同位素亏损的重要原因。就目前的资料来说,强烈伸展体制下岩石圈拆沉过程中经历过高温海水热液交换的再循环下部洋壳的部分熔融物的存在(交代)是一种可接受的解释(Wu *et al.*, 2002; 蔡剑辉等, 2004);而岩体全岩及其“整体”组成矿物(包括本文锆石)均具有强烈的 Eu 亏损(δEu 仅 0.01 ~ 0.04),特别是一般呈现 Eu 正异常的长石也发生明显的 Eu 负异常(δEu 仅 0.057)(Zhao *et al.*, 2002),说明岩体结晶前还经历过强烈的分异,锆石是从经历了长石高度分离结晶后的残留花刚质熔体中结晶的。因此,成矿物质的富集成矿可能和再循环下部洋壳近期富集交代及富含 F, Cl 等挥发分流体-水环境下的分离结晶两个因素的叠加有关。

前人对岩体成岩矿物氧同位素的研究显示,岩体中长石的氧同位素强烈亏损,但石英的氧同位素则仍然在地幔来源的范围,显示出岩浆结晶时发生的挥发分-水与熔体的交代温度不会高于 500°C (Jahn *et al.*, 2001)。本文对受到流体改造的深色锆石的研究显示,遭受后期流体作用,锆石稀土元素总量无明显变化,但轻稀土(LREE)和 Nb、Ta、U、Th 含量及 Th/U 比值降低,可能是锆石在流体的参与下发生了溶蚀再结晶作用,在这个过程中,成矿有关的元素被不同程度的逐出锆石晶格(Pidgeon *et al.*, 1998; Hoskin and Ireland, 2000; Tomaschek *et al.*, 2003),因此,我们认为后期的流体交代作用虽然可以对成矿产生贡献(使部分成矿元素重新活化并被富化),但可能不是成矿物质的主要来源。

6 结论

(1) 巴尔哲花岗岩赋矿锆石可以分为浅色和深色两种类型,两类阴极发光具有不同特征,浅色锆石可见较宽不连续振荡环带,暗示锆石形成时岩浆的温度较高,部分锆石存在核幔分区;和浅色锆石相比,深色锆石边部或内部凹坑、裂纹处溶蚀结构更发育,显示其形成过程中流体的参与更为明显。

(2) 巴尔哲岩体两类锆石均富含 Nb、U、Y 和 REE 元素,但深色锆石具有更高的 Fe 含量,两类锆石球粒陨石标准化稀土配分模式呈深“V”型,具非常显著的 Eu 负异常,岩体成矿期锆石具有幔源花岗岩来源特征。浅色锆石 I 型轻稀土富集,重稀土分异明显,具有高 Hf、Nb、Ta,低 Y 特征,浅色锆石 II 型轻稀土亏损,重稀土分异不明显,其稀土元素球粒陨石分布模式具有明显的“M 型”四分组效应,显示出锆石形成过程中经历过熔体-流体过程。岩浆结晶及和熔体-流体有关锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 $122.7 \pm 1.8\text{Ma}$,给出了该岩体成岩及成矿的年龄。

结果显示,大型稀有稀土金属的成矿物质的富集可能和源区经历的近期富集交代及岩体在富含 F, Cl 等挥发分流体-

水环境下的分离结晶两个因素的叠加有关,成岩与成矿近于同时完成;后期的流体交代作用虽然可以对成矿产生贡献,但可能不是成矿物质的主要来源。

致谢 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室陈小明教授和中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室刘勇胜教授在锆石电子探针分析和锆石 LA-ICP-MS 微量元素分析、U-Pb 定年及数据解释方面提供了重要帮助;中国科学院广州地球化学研究所牛贺才研究员在成文过程中提出了宝贵意见;二位审稿人提出了宝贵的修改意见;特此一并致谢。

References

- 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(3): 323–333
- Belousova EB, Giffin WL, O'Reilly S and Fisher NF. 2002. Igneous zircon; Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622
- Bi SJ, Li JW and Zhao XF. 2008. Hydrothermal zircon U-Pb dating and geochronology of quartz vein-type gold deposits; A review. *Geological Science and Technology Information*, 27(1): 69–76 (in Chinese)
- Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy F and Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45(1–4): 45–70
- Cai JH, Yan GH, Xiao CD, Wang GY, Mu BL and Zhang RH. 2004. Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the Mesozoic intrusive rocks in the Taihang-Da Hinggan Mountains tectonomagmatic belt and their source region. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1225–1242 (in Chinese with English abstract)
- Cao ZM, Zheng JB, An W and Li YG. 2004. Geochemistry of Xuebaoding alkali granite and its ore-controlling effect. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 34(5): 874–880 (in Chinese with English abstract)
- Chen DG, Delouie E, Chen H, Xia QK and Wu YB. 2004. Preliminary study of microscale zircon oxygen isotopes for Dabie-Sulu metamorphic rocks; Ion probe in situ analyses. *Chinese Science Bulletin*, 48(16): 1670–1678
- Collins WJ, Beams SD, White AJR and Chappell BW. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200
- Corfu F. 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500
- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1–2): 115–134
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641–644
- El-Bialy MZ and Streck MJ. 2009. Late Neoproterozoic alkaline magmatism in the Arabian-Nubian Shield; the postcollisional A-type granite of Sahara-Umm Adawi pluton, Sinai, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 2(2): 151–174
- Feng SZ. 2000. Geological characteristic and ore genesis of rare metal and rare-earth ore deposit in Baerze alkalic granite, Inner Mongolia. *Volcanology & Mineral Resources*, 21(2): 137–142, 149 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hattendorf B, Günther D, Chen L and Hu SH. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser Ablation-Inductively coupled Plasma-Mass spectrometry. *Geostandards Newsletter*, 26(2): 181–196
- Gu LX. 1990. Geological features, petrogenesis and metallogeny of A-type granites. *Geological Science and Technology Information*, 9(1): 25–31 (in Chinese with English abstract)
- Hoskin P and Ireland TR. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627–630
- Hoskin PWO. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637–648
- 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 suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 489–508
- 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(4): 171–198
- Jiang N, Zhang SQ, Zhou WG and Liu YS. 2009. Origin of a Mesozoic granite with A-type characteristics from the North China craton: Highly fractionated from I-type magmas? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 113–130
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1996. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391
- King PL, Chappell BW, Allen CM and White AJR. 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 501–514
- Klimm K, Holtz F and King PL. 2008. Fractionation vs. magma mixing in the Wangrah Suite A-type granites, Lachlan Fold Belt, Australia: Experimental constraints. *Lithos*, 102(3–4): 415–434
- Landenberger B and Collins W. 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi complex, Eastern Australia. *Journal of Petrology*, 37(1): 145–170
- Liégeois J, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization. *Lithos*, 45(1–4): 1–28
- Lin DS. 1994. Rare metal and REE deposits related to alkaline granites. *Mineral Resources and Geology*, 8(6): 401–406 (in Chinese with English abstract)
- Liu CQ, Huang ZL, Li HP and Su GL. 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 231–243 (in Chinese)
- Lu JJ, Chen WF, Zhu JC, Wang RC, Zeng QT and Zhao L. 2008. The characteristics of chloritized granite type tin deposit in the Furong tin deposit district in Hunan Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(12): 570
- Monani S and Valley JW. 2001. Oxygen isotope ratios of zircon; Magma genesis of low $\delta^{18}\text{O}$ granites from the British Tertiary Igneous Province, western Scotland. *Earth and Planetary Science Letters*, 184(2): 377–392
- Niu HC, Shan Q, Luo Y, Yang WB and Yu XY. 2008. Study on the crystal-rich fluid inclusions from the Baerzhe superlarge rare elements and REE deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2149–2154 (in Chinese with English abstract)
- Pidgeon RT, Nemchin AA and Hitchen GJ. 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: Implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(3): 288–299
- Poitrasson F, Pin C, Duthou J and Platevoet B. 1994. Aluminous subsolvus anorogenic granite genesis in the light of Nd isotopic

- heterogeneity. *Chemical Geology*, 112(3-4): 199-219
- Poitrasson F, Duthou J and Pin C. 1995. The relationship between petrology and Nd isotopes as evidence for contrasting anorogenic granite genesis: Example of the Corsican Province (SE France). *Journal of Petrology*, 36(5): 1251-1274
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by Ion Microprobe; Some examples from the western Alps. In: *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 373-400
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts; Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmaism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313-345
- Tomaschek F, Kennedy AK, Villa IM, Lagos M and Ballhaus C. 2003. Zircon from Syros, Cyclades, Greece; Recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism. *Journal of Petrology*, 44(11): 1977-2002
- Turner S and Foden J. 1996. Magma mingling in late-delamerian A-type granites at Mannum, South Australia. *Mineralogy and Petrology*, 56(3-4): 147-169
- Wang X and Pupin JP. 1992. Distribution characteristics of trace elements in zircons from granitic rocks. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, (2): 131-140 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX and Zhao ZH. 1997. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE Nb-Be-Zr superlarge deposit. *Geochimica*, 26(1): 25-26 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Cherniak DJ. 1997. Oxygen diffusion in zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(3-4): 527-544
- Wei CS, Zheng YF and Zhao ZF. 2001. Nd-Sr-O isotopic geochemistry constraints on the age and origin of the A-type granites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 95-111 (in Chinese with English abstract)
- Wickham SM, Litvinovsky BA, Zanvilevich AN and Bindeman IN. 1995. Geochemical evolution of Phanerozoic magmatism in Transbaikalia, East Asia; A key constraint on the origin of K-rich silicic magmas and the process of cratonization. *J. Geophys. Res.*, 100(B8): 15641-15654
- Wickham SM, Alberts AD, Zanvilevich AN, Litvinovsky BA, Bindeman IN and Schauble EA. 1996. A stable isotope study of anorogenic magmatism in East Central Asia. *Journal of Petrology*, 37(5): 1063-1095
- Windley BF. 1993. Proterozoic anorogenic magmatism and its orogenic connections. *Journal of the Geological Society*, 150(1): 39-50
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde SA. 2002. A-type granites in northeastern China; Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173
- Wu FY, Sun DY, Jahn BM and Wilde SA. 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 731-744
- Wu SP, Wu CL and Chen QL. 2007. Characteristics and tectonic setting of the Tula aluminous A-type granite at the south side of the Altyn Tagh fault, NW China. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1385-1392 (in Chinese with English abstract)
- 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: 2924-2932 (in Chinese with English abstract)
- Yang WB, Su WC, Liao SP, Niu HC, Luo Y, Shan Q and Li NB. 2011. Melt and melt-fluid inclusions in the Baerzhe alkaline granite: Information of the magmatic-hydrothermal transition. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1493-1499 (in Chinese with English abstract)
- Yuan ZX, Zhang M and Wan DF. 2003. A discussion on the petrogenesis of ^{18}O -low alkali granite: A case study of Baerzhe alkali granite in Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(2): 119-124 (in Chinese with English abstract)
- Zhao LL, Hu RZ, Yang JS, Peng JT, Li XM and Bi XW. 2007. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China. *Lithos*, 97(1-2): 161-173
- Zhao ZH, Masuda Akimasa and Shabani MB. 1992. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites. *Geochimica*, 21(3): 221-233 (in Chinese)
- Zhao ZH, Xiong XL, Hen XD, Wang YX, Qiang W, 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(6): 527-543
- Zheng YF, Chen KF, Gong B and Zhao ZF. 2003. Protolith nature of ultrahigh pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt; Evidence from zircon oxygen isotope and U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 48(2): 110-119 (in Chinese)

附中文参考文献

- 毕诗健, 李建威, 赵新福. 2008. 热液锆石 U-Pb 定年与石英脉型金矿成矿时代: 评述与展望. *地质科技情报*, 27(1): 69-76
- 蔡剑辉, 阎国翰, 肖成东, 王关玉, 牟保磊, 张任祐. 2004. 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Nd, Sr, Pb 同位素特征及物质来源探讨. *岩石学报*, 20(5): 1225-1242
- 曹志敏, 郑建斌, 安伟, 李佑国. 2004. 雪宝顶碱性花岗岩岩石地球化学与成矿控制. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 34(5): 874-880
- 冯守忠. 2000. 内蒙古巴尔哲碱性花岗岩稀有稀土矿床地质特征及成因探讨. *火山地质与矿产*, 21(2): 137-142, 149
- 顾连兴. 1990. A 型花岗岩的特征、成因及成矿. *地质科技情报*, 9(1): 25-31
- 林德松. 1994. 与碱性花岗岩有关的稀有稀土矿床. *矿产与地质*, 8(6): 401-406
- 刘丛强, 黄智龙, 李和平, 苏根利. 2001. 地幔流体及其成矿作用. *地学前缘*, 8(4): 231-243
- 牛贺才, 单强, 罗勇, 杨武斌, 于学元. 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(9): 2149-2154
- 汪相, Pupin JP. 1992. 花岗岩锆石中的微量元素的配分特征. *地质科学*, (2): 131-140
- 王一先, 赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铈铍矿床地球化学和成因. *地球化学*, 26(1): 25-26
- 魏春生, 郑永飞, 赵子福. 2001. 中国东部 A 型花岗岩形成时代及物质来源的 Nd-Sr-O 同位素地球化学制约. *岩石学报*, 17(1): 95-111
- 吴锁平, 吴才来, 陈其龙. 2007. 阿尔金断裂南西侧吐拉铝质 A 型花岗岩的特征及构造环境. *地质通报*, 26(10): 1385-1392
- 杨武斌, 牛贺才, 单强, 罗勇, 于学元, 裴愉卓. 2009. 巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究. *岩石学报*, 25(11): 2924-2932
- 杨武斌, 苏文超, 廖思平, 牛贺才, 罗勇, 单强, 李宁波. 2011. 巴尔哲碱性花岗岩中的熔体和熔体-流体包裹体: 岩浆-热液过渡的信息. *岩石学报*, 27(5): 1493-1495
- 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(2): 119-124
- 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼 MB. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应. *地球化学*, 21(3): 221-233
- 郑永飞, 陈福坤, 龚冰, 赵子福. 2003. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质: 锆石氧同位素和 U-Pb 年龄证据. *科学通报*, 48(2): 110-119