

内蒙古赵井沟钾长花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和岩石地球化学特征

张超, 李志丹, 李效广, 奥琮, 俞弼安, 王佳营, 李光耀, 张祺, 段明

(中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 赵井沟铌钽矿与区内花岗岩关系非常密切, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明矿区内黑云母钾长花岗岩形成时代为 125 ± 1 Ma。岩石地球化学分析结果显示, 矿区内晚中生代岩浆岩为准铝质-弱过铝质碱性岩类, 属于高钾钙碱性系列, 具有轻稀土元素富集、Eu 强负异常、大离子亲石元素(Rb、Th、U)和高场强元素(Hf、Y)强烈富集的地球化学特征, 属于 A1 亚类的 A 型花岗岩; 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.000 5 ~ 0.003 0 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -15.42 ~ -5.55, 对应的模式年龄 t_{DM2} 变化于 2 247 ~ 1 640 Ma 之间。花岗岩浆主要来源于地壳物质部分熔融的产物。

关键词: 赵井沟铌钽矿; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; Hf 同位素; 黑云母钾长花岗岩

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0303-15

Zircon U-Pb dating and Hf isotopic and geochemical characteristics for K-feldspar granite in Zhaojinggou, Inner Mongolia

ZHANG Chao, LI Zhi-dan, LI Xiao-guang, AO Cong, YU Reng-an, WANG Jia-ying, LI Guang-yao, ZHANG Qi and DUAN Ming

(Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Zhaojinggou Nb-Ta deposit has close relationship with granite. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating indicates that the age of biotite K-feldspar granite in the mining area is 125 ± 1 Ma. Geochemical data show that the Late Palaeozoic magmatic rock is characterized by metaluminous alkaline rock, high potassium and alkali, enrichment of LREE with strong negative Eu anomaly and enrichment of LILE (Rb, Th and U), and strong negative anomalies of Hf and Y in primitive mantle-normalized spidergrams. It thus belongs to A1 subtype of A type granites, and has $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios in the range of 0.000 5 ~ 0.003 0, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values in the range of -15.42 ~ -5.55 and corresponding model ages (t_{DM2}) between 2 247 and 1 640 Ma. Granite was formed in a post-orogenic setting, mainly derived from the partial melting of crustal materials.

Key words: Zhaojinggou Nb-Ta deposit; zircon U-Pb dating; geochemistry; Hf isotope; biotite K-feldspar granite

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41502082); Geological Survey Program from China Geological Survey (12120113057300, DD20160129, DD20190119)

乌拉山-大青山成矿带为华北板块北缘重要贵铜、金、稀有金属成矿带(图1)(俞弼安等, 2009; 杨亮, 2010; 杨文瑞等, 2010; 侯万荣等, 2011; 陈志广等, 2012; 聂风军等, 2013)。赵井沟铌钽矿位于

收稿日期: 2018-04-25; 接受日期: 2019-01-18; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502082); 中国地质调查项目(12120113057300, DD20160129, DD20190119)

作者简介: 张超(1987-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿床学研究及矿产地质调查工作, E-mail: 402709002@qq.com; 通讯作者: 李志丹(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿床学研究及矿产地质调查工作, E-mail: cugcug@qq.com。

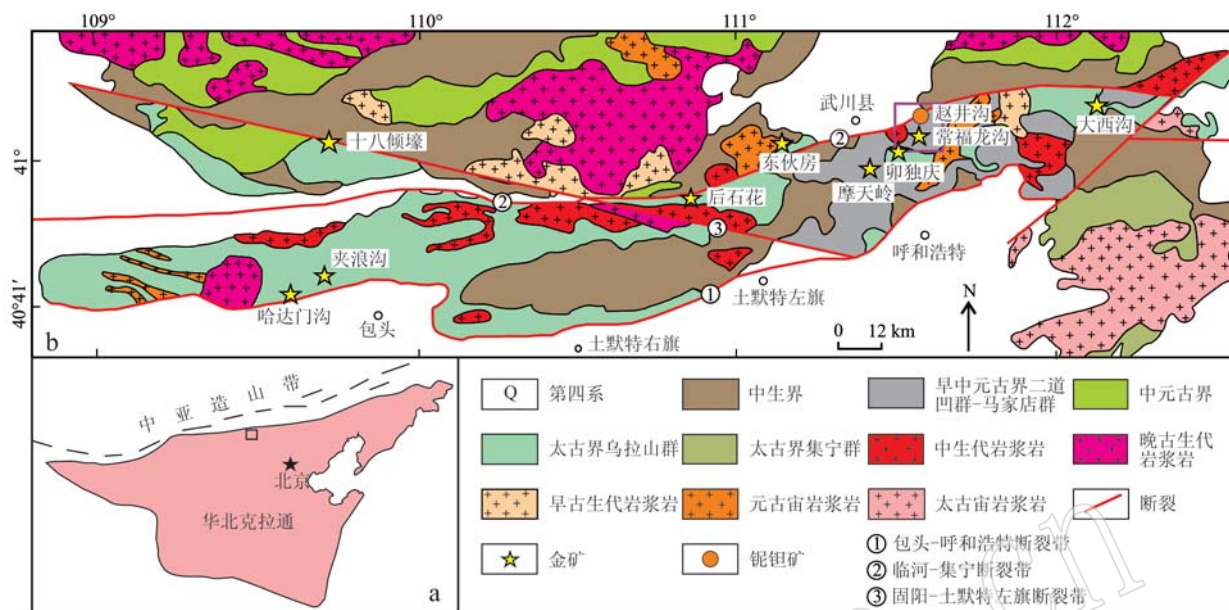


图1 内蒙古乌拉山-大青山一带地质矿产简图[a 据 Zhao 和 Cawood(2012)修改, b 据王梁等(2015)修改]

Fig.1 Simplified geological map of the Wulashan-Daqingshan area, Inner Mongolia (a modified after Zhao and Cawood, 2012; b modified after Wang Liang et al., 2015)

成矿带中部呼和浩特市武川县境内,为一大型稀有金属矿床,储量在8 000吨以上(聂凤军等, 2013)。赵井沟黑云母钾长花岗岩是矿区内的主要侵入岩体,呈不规则状分布于矿区中部和东南部,出露面积约2 km²(图2b)。前人对矿区内与成矿有关的岩体进行过岩石学、岩相学及年代学研究(Hao, 2012; 聂凤军等, 2013; 柴华等, 2013; 黄从俊等, 2013; 高允等, 2017),但对矿区内与成矿有密切关系的黑云母钾长花岗岩的时代和形成机制未给予应有的关注。为此,本文将以矿区内与成矿有关的细粒黑云母钾长花岗岩为对象,通过岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素特征分析,并结合前人研究成果,查明其时代、成因机制及其对成矿作用的制约。

1 矿床地质概况

赵井沟铌钽矿区内出露的地层为石炭纪变质砾岩、粗砂岩及前寒武纪变质砂岩、石英岩和千枚岩,其间呈断层接触。第四系主要分布于沟谷、洼地中,主要为冲积、洪积及砂砾层等,呈松散状。区内构造为NE向和NW向两组韧性-脆韧性断裂带,总体上早期以北西向韧性剪切为特征,晚期以北东向脆性推覆构造为特点,其中规模较大的断裂有F₁、F₂、F₃、F₄、F₅(图2b)。

区内的侵入岩体分布于矿区西南部,有早元古代闪长岩(Pt₁δ)、二叠纪中粗粒花岗岩(P₂γ)及早白垩世肉红色细粒钾长花岗岩(γ),后者构成区内侵入岩的主体,与成矿关系密切。此外,矿区内还发育大量的脉岩,主要类型有花岗细晶岩脉、含钨石英脉、含天河石钠长石化花岗岩脉和含天河石花岗伟晶岩脉,它们受原生构造裂隙控制,其中含天河石钠长石化花岗岩脉是主要含铌钽矿岩脉。

矿区内现已发现W矿和Nb-Ta矿,呈脉状分布于石炭系拴马桩组中,呈单斜产出,局部有小褶皱及裂隙,走向一般为20°~40°,倾向北西,倾角15°~25°。地层中解理裂隙发育,多属剪性裂隙,裂隙按产状大体上分为北东、近东西向两组,延伸较远,倾角一般较陡,前者30°~70°,后者一般在80°左右。含矿岩脉多沿此两组裂隙分布,其中含铌钽矿钠长石化花岗岩主要充填于北东向裂隙中,是该区主要容矿构造。近东西向裂隙主要充填有含钨石英脉,从岩脉穿插关系来看,北东向裂隙先于近东西向裂隙形成,给各种矿化及成矿创造了良好条件(图2)。

矿区位于赵井沟、脑包山一带,东西宽约2.8 km,南北长约7.4 km,形状为不规则状,面积约18 km²。出露地层主要为中元古界渣尔泰山群(ChQnZ)、石炭系拴马桩组(C₂sh)和少量第四系(Q)。矿区内出露的渣尔泰山群为一岩组地层,主

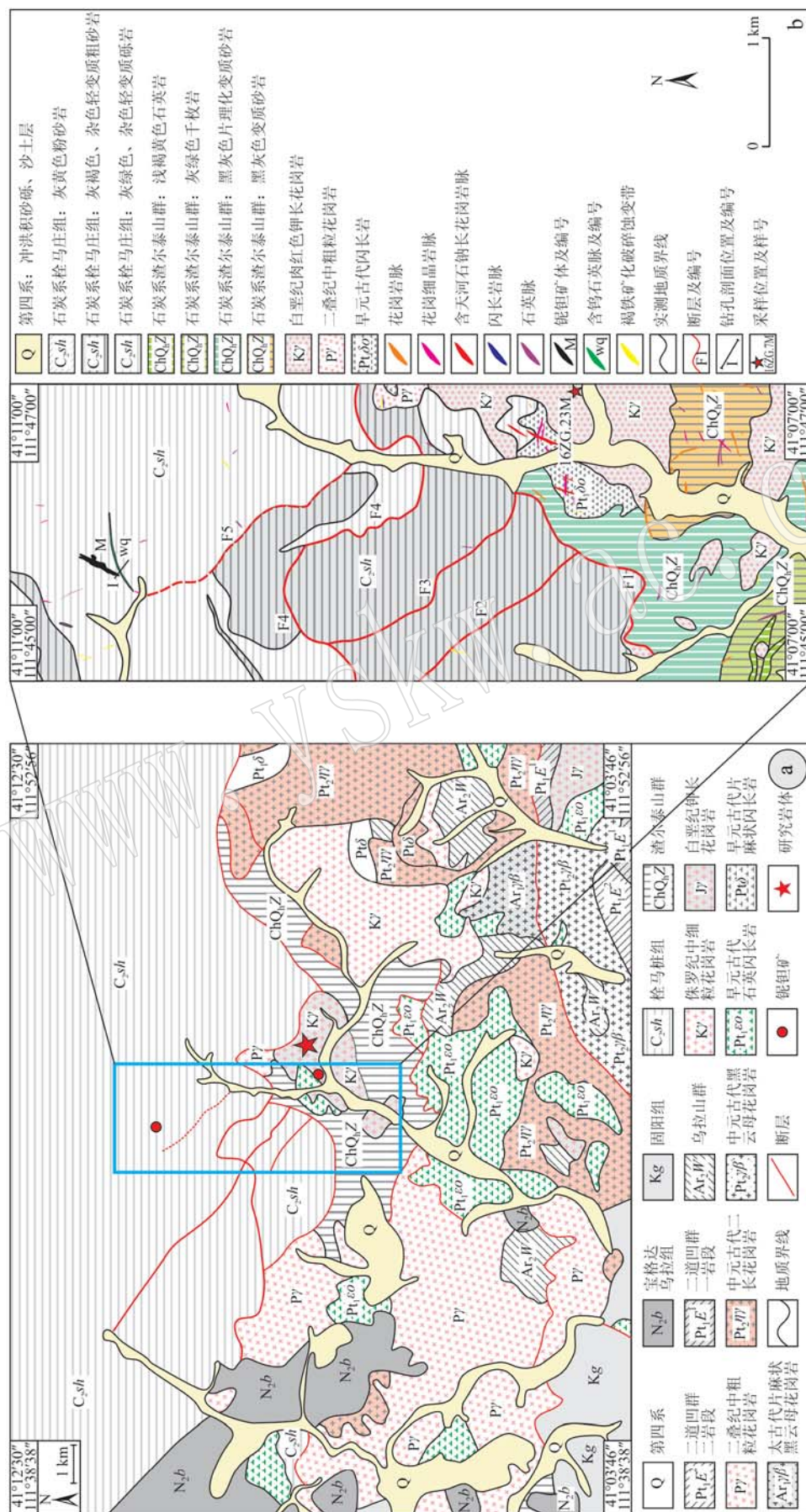


图 2 内蒙古赵井沟铌钽矿区域地质简图[a, 据柴华等(2013)修改]及地质图(b)

要分布于矿区南部,出露面积约 3.5 km^2 ,呈近东西向分布,主要岩性有千枚岩、变质砂岩和片理化变质砂岩。石炭系拴马桩组主要分布于矿区北部,出露面积约 12 km^2 ,亦呈近东西向分布,与下伏渣尔泰山群呈断层接触,铌钽矿体赋存于该组地层近北东向裂隙中,主要出露岩性为轻变质砾岩和砂岩。第四系主要分布于沟谷、洼地中,主要为冲积、洪积及砂砾层等,呈松散状。

2 黑云母钾长花岗岩特征

黑云母钾长花岗岩($K\gamma$)呈不规则状分布于矿区东南部和中部,侵位于早元古代和石炭纪地层中,出露面积约 2 km^2 (图2)。岩石为肉红色,块状构造,中-粗粒花岗结构,块状构造(图3a、3b),主要矿物为石英、钾长石、斜长石和少量黑云母,副矿物主

要有锆石、磷灰石等,其中石英呈它形-半自形粒状,粒度 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$,波状消光,含量 35%;钾长石呈自形-半自形柱状,粒度 $0.1 \sim 0.6 \text{ mm}$,轻度蚀变,具卡式双晶,含量 30%;斜长石呈自形-半自形柱状,粒度 $0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$,具聚片双晶,含量 20%;黑云母呈自形-半自形片状,粒度 $0.2 \sim 0.6 \text{ mm}$,含量 15%(图3c、3d)。该岩体局部存在轻度 Nb-Ta 矿化,其中 Nb_2O_5 含量为 $0.01\% \sim 0.025\%$, Ta_2O_5 含量为 $0.001\% \sim 0.0025\%$ 。

3 样品及分析测试

实验样品均来自于赵井沟铌钽矿南部细粒黑云母钾长花岗岩体,采样坐标为 $E 41^\circ 08' 10''$, $N 111^\circ 46' 59''$,所有样品都是经挑选的无蚀变或蚀变较弱的样品。

用于地球化学样品分析的黑云母钾长花岗岩样

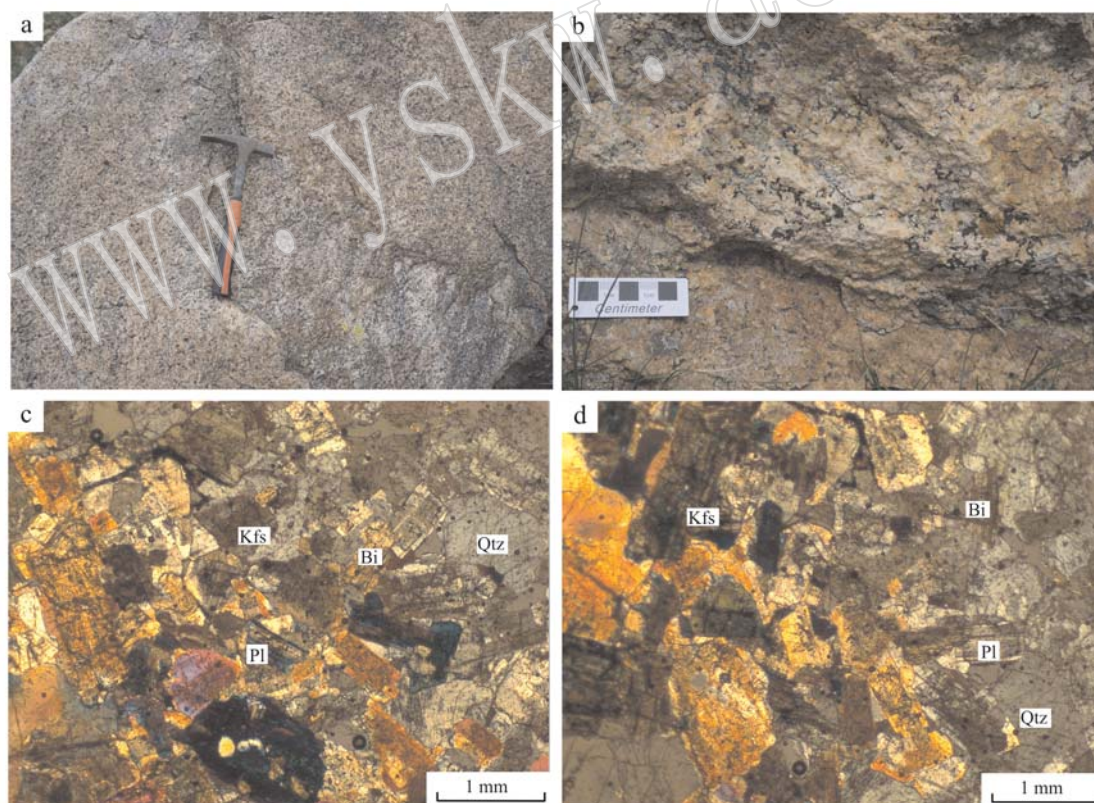


图3 赵井沟铌钽矿钾长花岗岩野外露头 and 手标本(a、b)和正交偏光显微(c、d)照片

Fig.3 Petrological features (a, b) and microphotographs under crossed nicols(c and d) of K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit

Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bi—黑云母
Qtz—quartz; Kfs—K feldspar; Pl—plagioclase; Bi—biotite

品 16ZG-23 处理时首先去除其表面附着物及风化物,而后低温烘干 24 h,剔除样品中的所有脉体,最后将样品粉碎至 200 目,以备测试。

锆石颗粒由廊坊宇能岩石矿物分选技术服务有限公司挑选,然后将单矿物粘贴在环氧树脂表层,待固化后对其进行打磨、清洗及抛光处理至表面光洁干净,进行透反射和阴极发光(CL)照相分析,选取最佳测试锆石区域,然后由北京锆年领航科技有限公司完成锆石制靶,中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成锆石照相工作。

中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成主微量元素、Hf 同位素分析及锆石定年等工作。锆石 U-Pb 同位素测试实验流程和仪器配置参见李志丹等(2016)。以标准锆石 GJ-1 作为外部锆石年龄标样进行仪器 U、Pb 同位素分馏校正,采用 ICPMS-DataCal(Liu *et al.*, 2010)程序进行年龄数据处理,采用 Isoplot(Ludwig, 2003)程序进行加权平均年龄计算及谐和图的绘制,采用 NIST SRM610 玻璃标样作为外标计算锆石中的 Pb、Th、U 含量,采用²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正。测试数据误差为 1 σ 。

主量元素采用 PW4400 型 X 荧光光谱仪(XRF)

测定,分析误差低于 5%,FeO 采用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定的方法,分析误差低于 2%;微量元素和稀土元素采用 X-series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,当元素含量大于 10×10^{-6} 时,相对标准误差优于 5%,当元素含量小于 10×10^{-6} 时,相对标准误差优于 10%。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

锆石显微观察显示,赵井沟黑云母钾长花岗岩(样品 16ZG-23)锆石呈宽板状或不规则状,晶体呈自形柱状,长度 70 ~ 120 μm ,宽度 40 ~ 80 μm ,长宽比介于 1.5:1 ~ 1:1 之间。阴极发光图像显示锆石震荡环带清晰,部分具扇形分带(图 4)。锆石 U-Pb 定年分析结果见表 1,测试数据误差为 1 σ 。由表 1 可见,锆石的 U 含量变化于 $277 \times 10^{-6} \sim 8\,134 \times 10^{-6}$ 之间,Th 含量为 $95 \times 10^{-6} \sim 2\,513 \times 10^{-6}$,Th/U 值在 0.06 ~ 0.80 之间(表 1),具有岩浆锆石特征。

样品 16ZG-23 中的 26 颗锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中分布于

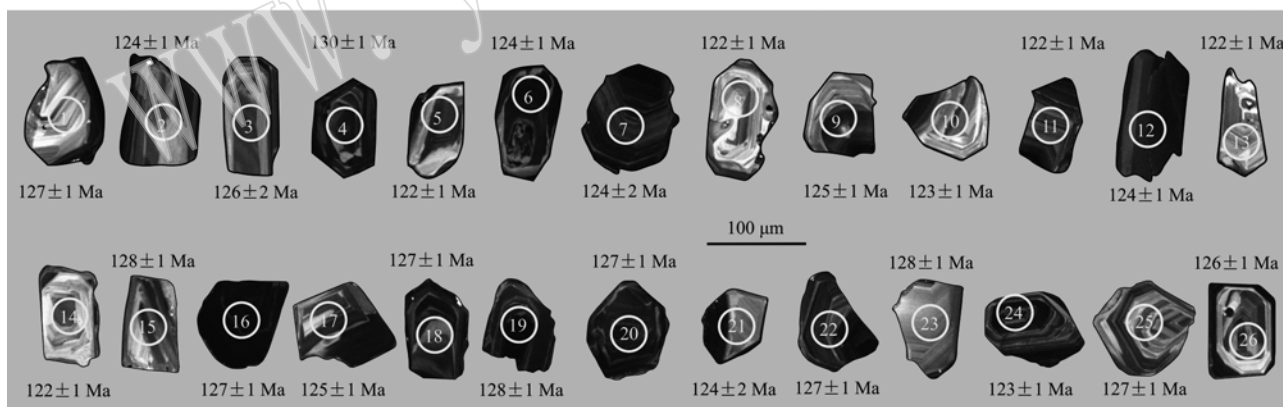


图 4 锆石阴极发光图片

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons

130 ~ 122 Ma 区间(表 1),在谐和图上集中分布于 125 Ma 区域,加权平均年龄为 125 ± 1 Ma($n = 26$, MSWD = 2.8, 95% 置信度)(图 5),反映锆石的结晶时代,同时也是对钾长花岗岩侵入时代的反映。

4.2 岩石地球化学

赵井沟地区黑云母钾长花岗岩全岩的主量、微量元素分析结果见表 2。黑云母钾长花岗岩具有较高的硅含量($\text{SiO}_2 = 75.83\% \sim 76.70\%$)、较高的碱含

量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.67\% \sim 9.07\%$, 平均 8.86%)、中等的铝含量($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.53\% \sim 12.84\%$)、低的 P_2O_5 (0.02% ~ 0.028%)和 CaO (0.32% ~ 0.44%)含量,里特曼指数介于 2.26 ~ 2.48 之间, FeO^T/MgO 值介于 20.68 ~ 91.63 之间,平均值为 56.62。在($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) - SiO_2 图上,数据点全部集中落入花岗岩区域(图 6);铝饱和指数(A/CNK)为 0.97 ~ 1.02,在 K_2O - SiO_2 图上,数据点落入高钾钙碱性系列区

表 1 赵井沟钨钽矿黑云母钾长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb analytical data of biotite K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit

测点号	含量/ 10^{-6}			同位素比值				年龄/Ma									
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{236}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	6	156	277	0.05	0.003 9	0.14	0.010 6	0.02	0.000 2	0.58	0.000 5	212	177.6	131	10.1	127	1.4
2	7	213	311	0.05	0.003 1	0.13	0.008 3	0.02	0.000 2	0.70	0.004 3	200	143.1	128	7.9	124	1.3
3	11	349	493	0.05	0.002 0	0.13	0.005 6	0.02	0.000 2	0.73	0.004 1	139	96.4	127	5.3	126	1.3
4	47	1 071	2 266	0.05	0.000 9	0.14	0.002 6	0.02	0.000 2	0.48	0.000 7	161	43.3	132	2.5	130	1.3
5	18	692	884	0.05	0.001 2	0.13	0.003 3	0.02	0.000 2	0.80	0.004 8	192	56.7	126	3.2	122	1.2
6	55	1 302	2 769	0.05	0.000 8	0.13	0.002 2	0.02	0.000 2	0.48	0.001 3	149	37.6	125	2.1	124	1.2
7	22	492	1 126	0.05	0.001 1	0.13	0.003 2	0.02	0.000 2	0.45	0.000 7	140	54.9	125	3.1	124	1.3
8	8	281	407	0.05	0.003 3	0.13	0.008 6	0.02	0.000 2	0.71	0.001 4	223	152.6	127	8.2	122	1.3
9	9	240	437	0.05	0.002 5	0.14	0.006 7	0.02	0.000 2	0.56	0.000 7	227	116.1	130	6.3	125	1.3
10	9	263	458	0.05	0.002 4	0.13	0.006 3	0.02	0.000 2	0.59	0.000 8	177	110.6	126	6.0	123	1.3
11	17	468	910	0.05	0.001 3	0.13	0.003 4	0.02	0.000 2	0.53	0.001 0	217	57.3	127	3.3	122	1.2
12	21	585	1 096	0.05	0.001 2	0.14	0.003 3	0.02	0.000 2	0.55	0.003 4	213	54.3	129	3.1	124	1.3
13	8	306	414	0.05	0.002 4	0.13	0.006 5	0.02	0.000 2	0.76	0.004 3	147	116.9	123	6.2	122	1.3
14	6	210	327	0.05	0.003 5	0.13	0.009 3	0.02	0.000 2	0.66	0.000 9	207	159.9	126	8.9	122	1.4
15	9	262	473	0.05	0.002 6	0.13	0.007 6	0.02	0.000 2	0.57	0.001 7	138	124.2	128	7.2	128	1.5
16	154	2 513	8 134	0.05	0.000 6	0.13	0.002 0	0.02	0.000 2	0.32	0.001 6	133	29.6	127	1.9	127	1.4
17	17	372	898	0.05	0.001 4	0.13	0.003 7	0.02	0.000 2	0.42	0.001 2	103	67.2	124	3.6	125	1.3
18	57	1 731	2 870	0.05	0.000 8	0.14	0.002 5	0.02	0.000 2	0.62	0.003 1	163	38.7	129	2.4	127	1.4
19	28	95	1 550	0.05	0.000 9	0.14	0.002 6	0.02	0.000 2	0.06	0.000 2	183	42.8	131	2.5	128	1.3
20	25	418	1 238	0.05	0.001 9	0.13	0.005 5	0.02	0.000 3	0.35	0.001 3	138	90.5	128	5.3	127	2.0
21	12	250	654	0.05	0.002 4	0.13	0.006 4	0.02	0.000 2	0.39	0.001 5	193	111.5	128	6.1	124	1.3
22	19	369	964	0.05	0.001 4	0.13	0.003 8	0.02	0.000 2	0.39	0.001 9	117	65.9	127	3.7	127	1.4
23	8	169	394	0.05	0.002 9	0.14	0.008 3	0.02	0.000 2	0.44	0.000 9	186	137.4	131	7.9	128	1.4
24	39	1 212	1 951	0.05	0.000 9	0.13	0.002 5	0.02	0.000 2	0.64	0.002 1	138	42.3	124	2.4	123	1.3
25	14	420	726	0.05	0.001 4	0.13	0.003 9	0.02	0.000 2	0.59	0.000 8	131	67.7	127	3.7	127	1.4
26	17	452	854	0.05	0.002 3	0.13	0.006 3	0.02	0.000 2	0.54	0.001 5	149	112.1	127	6.0	126	1.3

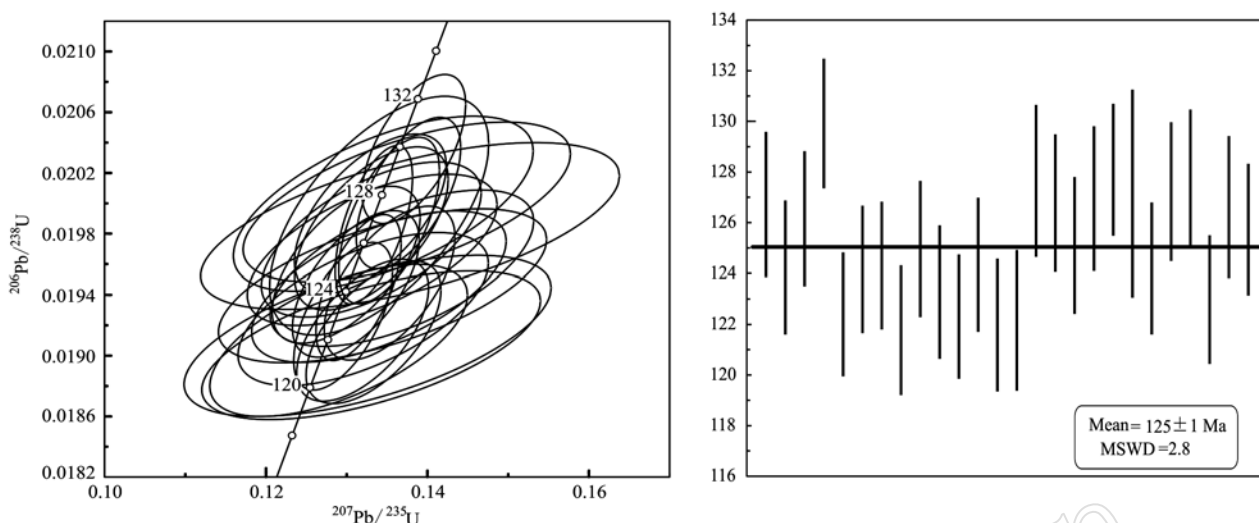


图5 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年谐和图

Fig. 5 Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram

表2 赵井沟钽铌矿黑云母钾长花岗岩主量元素($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element content for biotite K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit

样号	16ZG-23-1	16ZG-23-2	16ZG-23-3	16ZG-23-4	16ZG-23-5	16ZG-23-6	16ZG-23-7	16ZG-23-8	16ZG-23-9
SiO ₂	75.88	76.49	75.83	76.14	76.21	76.70	76.17	76.48	76.48
TiO ₂	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08
Al ₂ O ₃	12.79	12.77	12.57	12.84	12.70	12.64	12.53	12.73	12.74
Fe ₂ O ₃	1.12	0.72	1.3	0.85	1.08	0.62	1.17	0.83	0.82
FeO	0.14	0.2	0.25	0.18	0.11	0.24	0.23	0.13	0.14
MnO	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
CaO	0.41	0.35	0.44	0.33	0.38	0.33	0.42	0.32	0.32
Na ₂ O	4.5	4.27	4.12	4.55	4.38	4.13	3.98	4.41	4.41
K ₂ O	4.42	4.72	4.91	4.52	4.29	4.59	4.75	4.38	4.37
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Total	99.98	99.98	99.98	99.98	99.76	99.71	99.73	99.76	99.80
灼失	0.56	0.33	0.41	0.44	0.48	0.34	0.36	0.36	0.39
A/NK	2.34	2.24	2.08	2.36	2.41	2.29	2.14	2.41	2.42
A/CNK	0.99	1.00	0.97	0.99	1.01	1.02	1.01	1.01	1.01
K ₂ O + Na ₂ O	8.92	8.99	9.03	9.07	8.67	8.72	8.73	8.79	8.78
K ₂ O / Na ₂ O	0.98	1.11	1.19	0.99	0.98	1.11	1.19	0.99	0.99
σ	2.42	2.41	2.48	2.48	2.26	2.26	2.30	2.31	2.30
FeO ^T / MgO	29.43	20.68	43.02	27.79	77.27	44.33	91.63	87.68	87.78
La	12.50	3.63	14.70	7.76	10.40	6.38	12.60	9.21	9.88
Ce	40.7	29.5	53.7	34.2	22.1	17.0	25.0	21.9	22.2
Pr	3.28	1.18	4.41	2.25	3.68	2.58	4.48	3.61	3.93
Nd	9.65	3.99	15.80	7.40	15.20	11.00	19.40	15.90	17.60
Sm	2.26	1.02	4.51	1.87	5.50	3.81	6.43	5.86	6.30
Eu	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
Gd	2.28	1.07	4.44	1.66	5.76	3.45	6.34	5.42	5.62
Tb	0.40	0.19	0.77	0.26	1.24	0.72	1.33	1.16	1.12
Dy	2.28	1.11	4.37	1.46	7.48	4.18	8.08	6.63	6.22
Ho	0.45	0.21	0.82	0.26	1.38	0.74	1.46	1.18	1.10
Er	1.24	0.53	1.93	0.67	3.89	2.01	3.92	3.39	3.02
Tm	0.20	0.08	0.24	0.09	0.58	0.28	0.53	0.54	0.47
Yb	1.29	0.47	1.41	0.58	3.74	1.64	3.07	3.50	2.98
Lu	0.19	0.07	0.19	0.08	0.53	0.23	0.42	0.49	0.42

续表 2

Continued Table 2

样号	16ZG-23-1	16ZG-23-2	16ZG-23-3	16ZG-23-4	16ZG-23-5	16ZG-23-6	16ZG-23-7	16ZG-23-8	16ZG-23-9
ΣREE	76.73	43.05	107.31	58.55	81.51	54.04	93.09	78.82	80.89
LREE	68.40	39.33	93.14	53.49	56.91	40.79	67.94	56.51	59.94
HREE	8.33	3.72	14.17	5.06	24.60	13.25	25.15	22.31	20.95
L/H	8.21	10.56	6.57	10.56	2.31	3.08	2.70	2.53	2.86
δEu	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
δCe	1.52	3.48	1.62	1.98	0.87	1.03	0.81	0.93	0.87
(La/Yb) _N	6.95	5.54	7.48	9.60	1.99	2.79	2.94	1.89	2.38
Rb	254	275	232	297	304	278	232	296	275
Ba	11.9	9.64	9.26	7.28	19	10.8	11.1	12.2	11.2
Th	27.3	12.0	56.0	30.1	31.5	19.8	17.5	45.2	39.3
U	7.75	9.86	8.78	9.06	3.53	4.68	2.90	5.22	4.58
Nb	154	152	130	168	125	143	115	154	162
Ta	8.83	5.59	4.23	7.30	6.43	5.21	3.79	6.83	6.81
Sr	17.7	16.6	19.6	17.1	18.0	16.2	19.2	16.2	16.5
Zr	165.0	99.8	97.0	194.0	142.0	94.1	83.3	165.0	178.0
Hf	8.35	5.25	4.88	10.40	7.41	4.86	4.35	8.91	9.45
Y	12.90	4.48	16.50	5.91	33.20	16.00	28.70	25.30	22.60
Cr	2.00	1.73	2.89	1.76	2.20	2.96	1.24	1.38	1.60
Co	1.09	0.97	0.95	1.06	0.32	0.20	0.19	0.30	0.33
Ni	3.44	2.41	2.05	2.90	2.94	3.00	1.66	2.40	3.14
Sc	8.73	7.40	7.79	8.30	5.01	12.20	11.20	11.60	10.80
V	2.97	4.19	4.86	3.60	2.45	2.67	2.00	2.37	2.81
Pb	38.4	56.1	26.9	35.4	16.1	25.6	11.4	18.0	17.6
Cu	1.36	1.03	1.81	1.04	3.14	2.91	2.99	2.67	2.98
Zn	65.6	44.3	42.7	43.4	65.7	52.2	52.5	65.1	61.8
Cs	3.9	3.57	2.23	3.88	3.07	2.80	1.54	2.89	3.06
Be					4.98	4.56	3.86	5.12	5.07
Ga					23.8	21.1	19.0	23.5	22.6
Ge					0.71	0.72	0.76	0.76	1.18
F					1 200	692	1 200	882	966

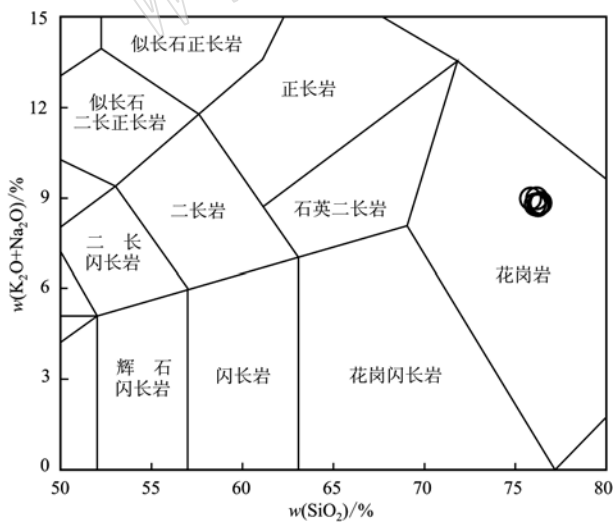


图 6 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩的(K₂O + Na₂O)–SiO₂图解(底图据 Middlemost, 1994)

Fig. 6 Biotite K-feldspar granite samples from the Zhaojing-gou Nb-Ta deposit plotted on (K₂O + Na₂O)–SiO₂(base dia-gram after Middlemost, 1994)

域(图 7a),在 A/NK – A/CNK 图解中数据点集中于弱准铝质与弱过铝质区域(图 7b)。

赵井沟铌钽矿岩浆岩的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线具有极强的负 Eu 异常(δEu = 0.01 ~ 0.02),总体上呈非常典型的 V 字形(图 8a),与典型 A 型花岗岩稀土元素特征(Whalen *et al.*, 1987)相类似。稀土元素总量较低且变化范围相对不大(ΣREE = 43.05 × 10⁻⁶ ~ 107.31 × 10⁻⁶,平均为 74.89 × 10⁻⁶),轻稀土元素富集,重稀土元素相对亏损,LREE/HREE = 2.31 ~ 10.56,(La/Yb)_N = 1.89 ~ 9.60。微量元素标准化蛛网图(图 8b)显示赵井沟铌钽矿钾长花岗岩明显亏损 Ba、Sr、P、Ti 等元素,富集高场强元素(HFSE)如 Nd、Hf、Y 和大离子亲石元素(LILE)如 Rb、Th、U 等。10 000 Ga/Al 值变化于 2.86 ~ 3.54 之间,平均值为 3.28,明显高于世界 S 型(2.39)花岗岩和 I 型(2.25)花岗岩平均值(Whalen *et al.*, 1987),具有 A 型花岗岩特征。

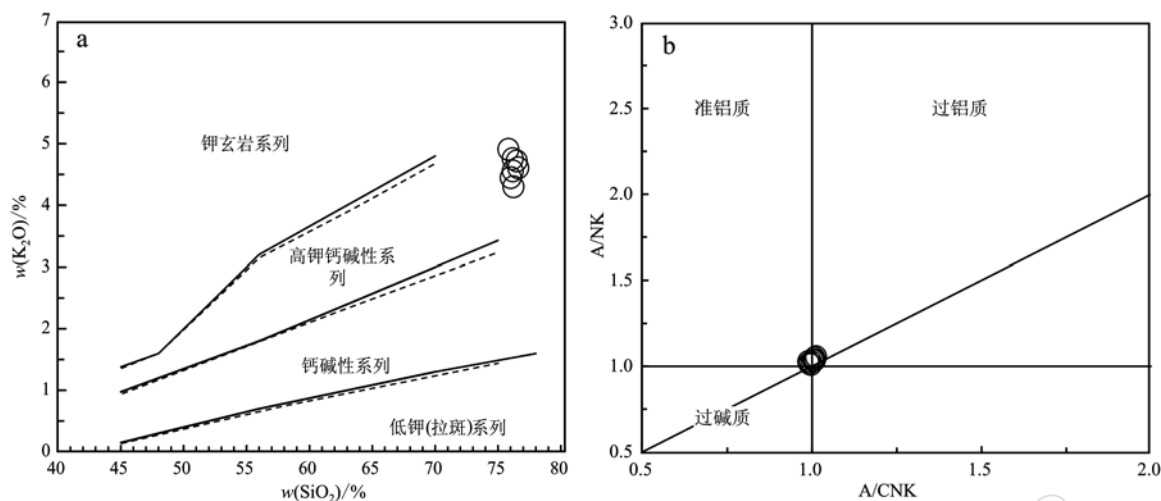


图7 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩的 K_2O-SiO_2 图(a, 实线据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985) 和含铝指数图(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 7 K_2O versus SiO_2 diagram (a, solid line after Peccerillo and Taylor, 1976; dotted line after Middlemost, 1985) and aluminous index diagrams (b, after Maniar and Piccoli, 1989) for biotite K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit

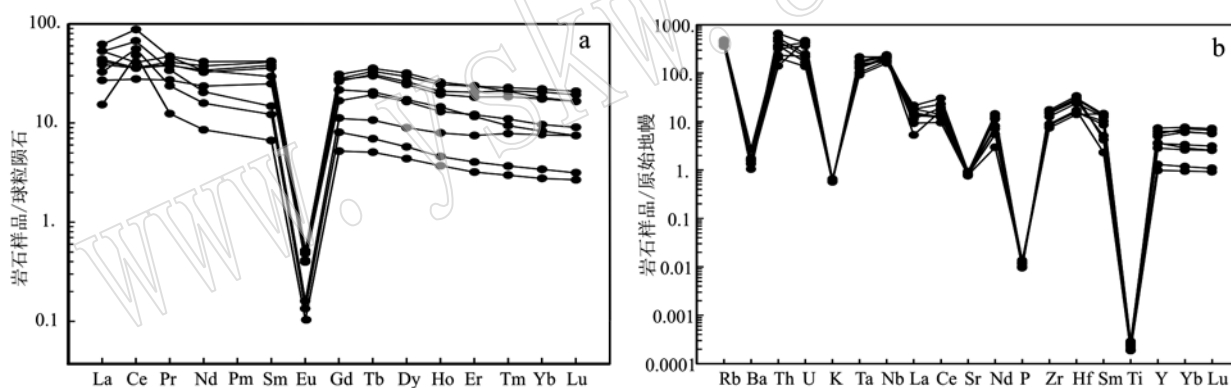


图8 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (球粒陨石和原始地幔标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) for biotite K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit (chondrite and primitive mantle values after Sun and McDonough, 1989)

4.3 锆石 Hf 同位素特征

在锆石 U-Pb 年代学测试的基础上,对已获得年代数据的 26 颗锆石进行了原位 Hf 同位素测试。其中 16ZG. 23. 3、16ZG. 23. 16、16ZG. 23. 22 及 16ZG. 23. 24 点在测试中受剥蚀程度和激光半径等的影响出现测试样成分混合的情况,数据信号具有较大波动,因而去除。具体测试结果(表 3)显示, $^{176}Yb/^{177}Hf$ 和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 的比值范围分别为 0.012 5~0.084 5 和 0.000 5~0.003 0, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化在 -15.42~-5.55 之间,平均值为 -9.64; $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值范围为 0.282 189~0.282 479,平均值为 0.282 360;根据锆

石 U-Pb 年龄计算的亏损地幔二阶段模式年龄 t_{DM2} 变化范围为 2 247. 24~1 640.62 Ma, 平均值为 1 876.03 Ma。

5 讨论

5.1 成岩时代

研究区属于大青山呼和浩特伸展拆离断层带, Davis 和 Darby (2010) 从离研究区不远的该断层带下盘和上盘的黑云母和透长石中得到的 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 同位素年龄分别为 125.8 ± 0.6 Ma 和 121.4 ± 0.75 Ma,

表3 锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 Zircon Hf isotopic compositions

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
16ZG.23.1	0.016 8	0.000 1	0.000 7	0.000 0	0.282 189	0.000 026	127	-15.42	1 485.98	2 247.24	-0.98
16ZG.23.2	0.032 1	0.000 4	0.001 2	0.000 0	0.282 358	0.000 021	124	-9.69	1 270.38	1 880.11	-0.96
16ZG.23.4	0.039 1	0.000 4	0.001 4	0.000 0	0.282 308	0.000 024	126	-11.37	1 345.39	1 989.49	-0.96
16ZG.23.5	0.042 8	0.000 3	0.001 6	0.000 0	0.282 368	0.000 017	130	-9.21	1 269.71	1 856.52	-0.95
16ZG.23.6	0.032 8	0.000 6	0.001 3	0.000 0	0.282 428	0.000 019	122	-7.88	1 173.32	1 742.24	-0.96
16ZG.23.7	0.051 6	0.001 2	0.001 9	0.000 0	0.282 467	0.000 021	124	-5.88	1 136.14	1 640.62	-0.94
16ZG.23.8	0.023 5	0.000 3	0.000 9	0.000 0	0.282 311	0.000 018	124	-11.13	1 324.90	1 976.87	-0.97
16ZG.23.9	0.025 0	0.000 4	0.001 0	0.000 0	0.282 243	0.000 023	122	-13.55	1 422.84	2 129.09	-0.97
16ZG.23.10	0.017 9	0.000 1	0.000 7	0.000 0	0.282 377	0.000 021	125	-8.77	1 226.43	1 827.42	-0.98
16ZG.23.11	0.012 5	0.000 1	0.000 5	0.000 0	0.282 373	0.000 020	123	-8.94	1 225.35	1 836.05	-0.98
16ZG.23.12	0.025 3	0.000 1	0.001 0	0.000 0	0.282 411	0.000 019	122	-7.65	1 187.68	1 755.01	-0.97
16ZG.23.13	0.032 1	0.000 2	0.001 3	0.000 0	0.282 294	0.000 020	124	-11.78	1 361.73	2 018.08	-0.96
16ZG.23.14	0.034 3	0.001 0	0.001 3	0.000 0	0.282 272	0.000 020	122	-12.64	1 394.12	2 069.23	-0.96
16ZG.23.15	0.024 5	0.000 2	0.001 0	0.000 0	0.282 288	0.000 021	122	-12.67	1 359.56	2 049.22	-0.97
16ZG.23.17	0.053 6	0.000 2	0.002 0	0.000 0	0.282 397	0.000 019	127	-8.30	1 240.32	1 795.73	-0.94
16ZG.23.18	0.029 3	0.001 2	0.001 1	0.000 0	0.282 330	0.000 019	125	-11.19	1 304.34	1 956.04	-0.97
16ZG.23.19	0.051 3	0.000 2	0.001 9	0.000 0	0.282 375	0.000 021	127	-9.13	1 270.62	1 846.80	-0.94
16ZG.23.20	0.067 6	0.002 6	0.002 4	0.000 1	0.282 479	0.000 021	128	-5.55	1 134.75	1 618.43	-0.93
16ZG.23.21	0.024 2	0.000 4	0.000 9	0.000 0	0.282 406	0.000 019	127	-7.85	1 193.95	1 767.41	-0.97
16ZG.23.23	0.018 0	0.000 3	0.000 7	0.000 0	0.282 408	0.000 020	127	-7.69	1 183.13	1 759.16	-0.98
16ZG.23.25	0.084 5	0.000 5	0.003 0	0.000 0	0.282 409	0.000 017	123	-8.06	1 259.44	1 780.27	-0.91
16ZG.23.26	0.062 0	0.000 1	0.002 3	0.000 0	0.282 434	0.000 016	127	-7.62	1 198.13	1 731.59	-0.93

认为伸展变形发生在 126 ~ 121 Ma (刘正宏等, 2003)。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明, 锆石年龄集中分布于 130 ~ 122 Ma 区间 (表 1), 在谐和图上, 集中于 125 Ma 附近, 其平均年龄值为 125 ± 1 Ma (MSWD = 2.8) (图 5)。阴极发光图像显示大部分锆石呈灰黑色宽板状或不规则状, 晶体形态相对较好, 具有较暗的发光性, 发育明显的岩浆振荡环带 (图 4), 具有典型的岩浆锆石特点, 且可能被后期流体改造。结合测试点都分布在谐和线上的特点, 说明样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄代表了黑云母钾长花岗岩的结晶年龄, 证明成岩时代与大青山伸展变形同时代发生。另外, 高允等 (2017) 得到的白云母坪年龄 123.57 ± 0.66 Ma (成矿年龄) 和等时线年龄 124.0 ± 2.0 Ma (成岩年龄) 相契合, 也表明成岩时代与成矿时代相同 (张超, 2014), 揭示赵井沟铌钽矿的成矿作用与黑云母钾长花岗岩岩浆活动存在密切成因联系。

5.2 岩石成因

该地区位于临近中亚造山带的华北地台北缘, 古生代经历古亚洲洋演化的过程, 中生代受到华北克拉通减薄影响 (陈志广, 2012), 经历了多期韧性剪切变形、推覆和褶皱等构造运动的影响, 总体上早期以韧性剪切为特征, 晚期以脆性推覆构造为特点,

先后形成了较为复杂的构造-岩浆体系。

世界上 S 型、M 型、I 型花岗岩的划分均由其源岩性质决定, 而 A 型花岗岩的分类不涉及其成岩物质来源, 其特征为: ① REE 具有明显的负 Eu 异常; ② 高 Zr、Nb、Ga 和 Y; ③ 富 SiO_2 ; ④ 贫 Al_2O_3 、Ba、Sr、P 和 Ti (苏玉平等, 2005; 贾小辉等, 2009; 吴锁平等, 2007; 张旗, 2013); ⑤ 以三“ A ”为特征, 即非造山 (anorogenic)、碱性 (alkaline)、无水 (anhydrous) (Loiselle and Wones, 1979)。通过数据对比, 发现赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩具有典型 A 型花岗岩特征, 即其稀土元素配分曲线呈典型的 V 字形, 富 SiO_2 , 贫 Al, 明显亏损 Sr、P、Ba、Ti 等元素、10 000 Ga/Al 值明显高于世界 S 型 (2.39) 花岗岩和 I 型 (2.25) 花岗岩的平均值 (Whalen *et al.*, 1987)。在 A 型花岗岩微量元素判别图 (Whalen *et al.*, 1987) 中, 所有样品数据均落入 A 型花岗岩的范围内 (图 9), 在 A 型花岗岩亚类判别图 (Eby, 1990) 中, 均落入 A1 型区域内 (图 10)。综上所述, 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩成因类型为 A1 亚类的 A 型花岗岩。

5.3 构造环境判别

花岗岩的微量元素组成明显受其成岩构造环境的制约, 将赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩样品投

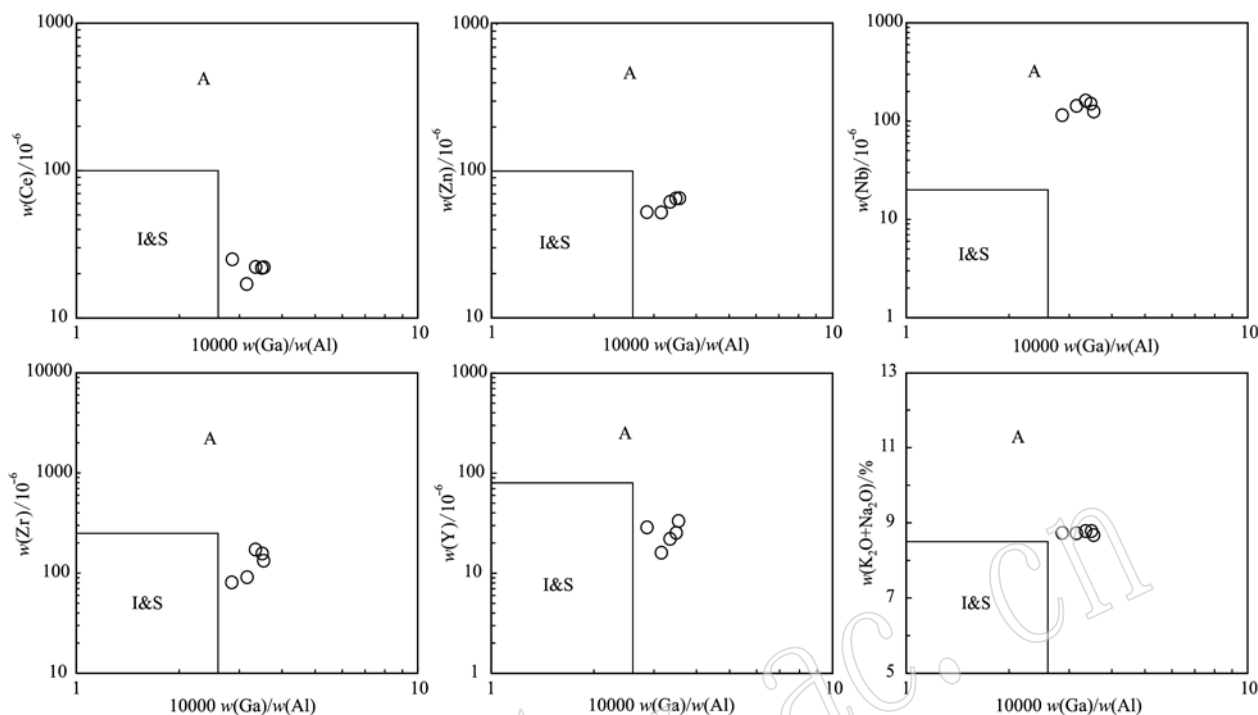


图9 赵井沟铌钽矿钾长花岗岩 10 000 Ga/Al - Ce、Zn、Nb、Zr、Y 和 $K_2O + Na_2O$ 图解(底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 9 Diagrams of 10 000 Ga/Al - Ce, Zn, Nb, Zr, Y and $K_2O + Na_2O$ for K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit (base map after Whalen *et al.*, 1987)

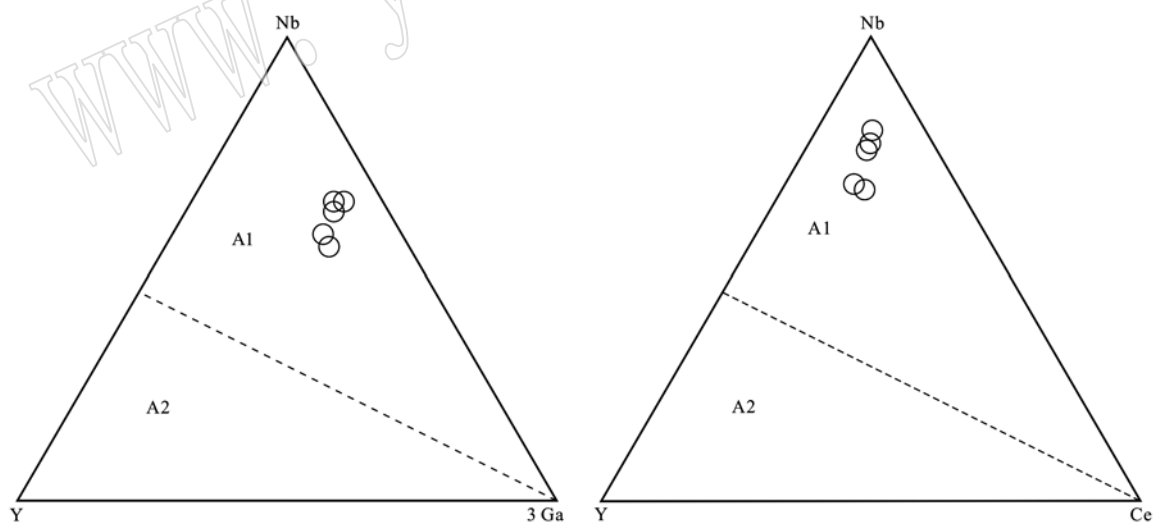


图10 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩的 Nb - Y - 3 Ga 和 Nb - Y - Ce 图解(底图据 Eby *et al.*, 1990)

Fig. 10 Nb - Y - 3 Ga and Nb - Y - Ce diagrams for biotite K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit (base map after Eby *et al.*, 1990)

点于 Rb - (Y + Nb) 构造环境判别图解中, 所有样品均落入板内环境中(图 11)。这种环境有利于岩浆演化作用和底侵作用的发生, 从而形成 A 型花岗岩(肖庆辉等, 2009)。

近年来在东北亚显生宙大陆演化研究中识别出一个超大面积的早白垩世巨型地壳伸展省(Wang *et al.*, 2011, 2012), 其地质特征包括一系列变质核杂岩、断陷盆地及大规模火山喷发活动(Meng *et al.*,

2003; Wang *et al.*, 2006; Donskaya *et al.*, 2008)。新获得的赵井沟花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 125 ± 1 Ma (MSWD = 2.8), 表明其侵位于早白垩世, 形成年龄与内蒙古中东部包括大青山造山带大多数后造山 A 型花岗岩的年龄一致, 与华北北缘 150 ~ 110 Ma 期间后造山阶段的晚期强烈伸展拉张阶段相吻合(刘红涛等, 2002), 属于东北亚显生宙巨型地壳伸展省, 印证了大青山造山带在早白垩世为后造山伸展拉张构造演化阶段。

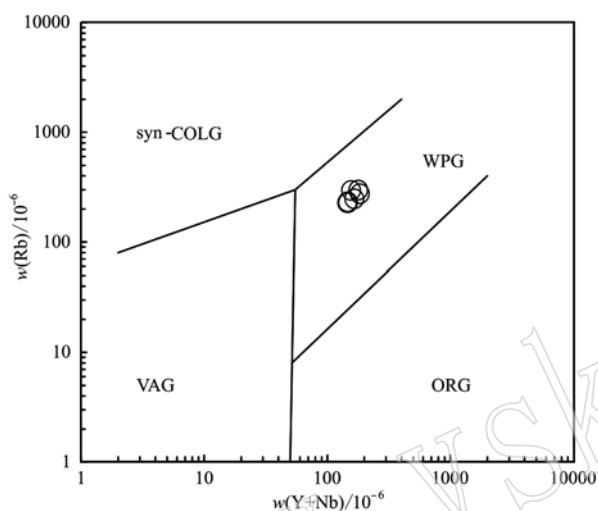


图 11 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩构造环境判别图解 (底图据 Pearce, 1996)

Fig. 11 Discrimination diagrams of tectonic setting for biotite K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit (base map after Pearce, 1996)

Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩

Syn-COLG—syn-collision granites; VAG—volcanic arc granites; ORG—ocean ridge granites; WPG—intraplate granites

5.4 岩浆源区特征

由于锆石 Lu-Hf 同位素体系封闭温度较高, 其比值不会随后期部分熔融或分离结晶等岩浆作用而发生变化 (Scherer *et al.*, 2000), 因此锆石原位 Hf 同位素分析是示踪岩浆源区的重要方法之一 (Griffin *et al.*, 2000; Bouvier *et al.*, 2008; 周振华等, 2014; 关俊雷等, 2014; 赵辛敏等, 2014; 原垭斌等, 2014)。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值反映了岩浆源区的成分特征, 通常认为低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值指示岩浆组分由古老基底地壳物质熔融形成, 并未受幔源组分影响, 而偏高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值则指示其形成受到了幔源岩浆的加入及不同程度的混染及结晶作用影响 (邱检生等, 2008)。赵井沟铌钽矿细粒黑云母钾长花岗岩岩浆

锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-15.42 \sim -5.55$, 全部为负值且值较低; 同时, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解 (图 12) 中, 绝大多数样品点落在下地壳和地壳平均区域, 显示赵井沟铌钽矿花岗岩岩体源岩物质主要来源于下地壳。

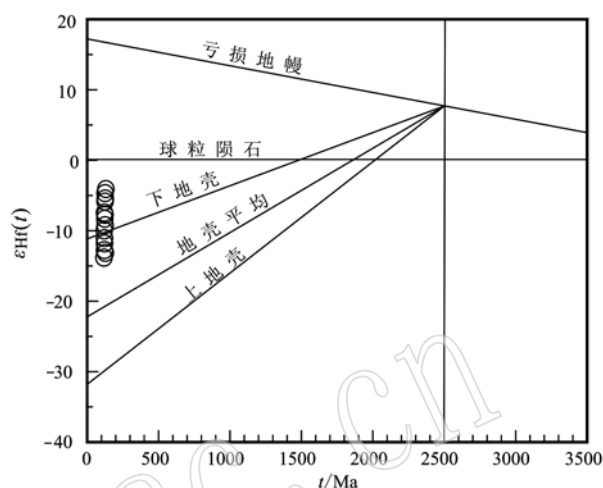


图 12 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩的锆石 Hf 同位素演化图解

Fig. 12 Hf isotopic diagram of the biotite K-feldspar granite in the Zhaojinggou Nb-Ta deposit

赵井沟花岗岩锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.0005 \sim 0.0030$, 且大多数小于 0.002, 表明锆石在花岗岩岩体形成之后漫长的演化过程中 ^{176}Lu 衰变生成的 ^{176}Hf 极少, 所以锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值可以为讨论岩体成因提供重要信息 (吴福元等, 2007)。同时, 样品所有测点的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值介于 $-0.98 \sim -0.91$ 之间, 明显小于铁镁质地壳 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值 (-0.34) 和硅铝质地壳 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值 (-0.72 , Vervoort *et al.*, 1996), 故二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 更能反映其源区物质在古老下地壳的平均留存年龄。其岩浆锆石的二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $2247.24 \sim 1640.62$ Ma 远远大于岩体锆石 U-Pb 年龄 (125 Ma), 暗示本区古元古代时期发生了一次重要的地壳增生事件 (吴福元等, 1999; 隋振民等, 2010)。

受岩石圈地幔上拱作用和早期各种深大断裂活化等的影响, 上地壳火山-沉积岩和下地壳基性岩均有可能发生变质变形及部分熔融; 同时, 古老地壳熔融形成的岩浆在各种地质条件下上升过程中受到上地壳不同程度的混染, 进而产生富碱含铌钽中酸性岩浆, 形成规模不等、空间形态分布不同的花岗岩类侵入岩, 赵井沟铌钽矿黑云母钾长花岗岩就是此阶段岩浆作用的产物 (聂风军等, 2013)。

6 结论

(1) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明赵井沟铌钽矿花岗岩体形成年龄为 125 ± 1 Ma;

(2) 岩石地球化学分析结果表明, 矿区晚古生代白垩纪花岗岩为准铝-弱过铝质、高钾钙碱性系列, 轻稀土元素富集, 具极强的 Eu 负异常, 大离子亲石元素 (Rb、Th、U) 和高场强元素 (Nd、Hf、Y) 强烈富集;

(3) 矿区钾长花岗岩成因类型为 A1 亚类的 A 型花岗岩;

(4) 花岗岩体主要是在多种地质因素影响下由部分下地壳物质熔融形成, 在后期上升过程中受少量上地壳物质混染;

(5) 赵井沟铌钽矿钾长花岗岩成岩时代与成矿时代相同, 揭示黑云母钾长花岗岩岩浆活动与铌钽矿的成矿作用存在密切成因联系。

References

- Bouvier A, Vervoort J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1~2): 48~57.
- Chai Hua and Wu Jinglong. 2013. Albite granites from the Zhaojinggou Nb-Ta polymetallic deposit in Wuchuan County of Inner Mongolia and their relationship to metallogenesis[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 289(15): 69~71(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiguang, Gao Bangfei, Huang Rongwei, *et al.* 2012. Geological characteristics, metallogenic patterns and geological significances of Changfulong gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Gold*, 33(6): 11~16(in Chinese with English abstract).
- Davis G A and Darby B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqingshan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 1: 1~20.
- Donskaya V, Windley B F, Mazukabzov A M, *et al.* 2008. Age and evolution of Late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia[J]. *Journal of the Geological Society (London)*, 165(1): 405~421.
- Eby G N. 1990. The A type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26(1~2): 115~134.
- Gao Yun, Sun Yan, Zhao Zhi, *et al.* 2017. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of muscovite from the Zhaojinggou Nb-Ta polymetallic deposit in Wuchuan County of Inner Mongolia and its geological implications[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(5): 551~558(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-ICP-MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Guan Junlei, Geng Quanru and Wang Guozhi. 2014. Zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions of the Risong granite in North Gangdese, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(1): 36~52(in Chinese with English abstract).
- Hao Z G, Fei H C and Liu L. 2012. A super-large tantalum and niobium ore found in Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 531~532.
- Hou Wanrong, Nie Fengjun, Du Andao, *et al.* 2011. Isotopic evidence for determining the devonian gold and molybdenum mineralization in the Hadamengou Area, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 57(4): 583~590(in Chinese with English abstract).
- Huang Congjun, Wang Daoyong, Li Zeqin, *et al.* 2013. Analysis of ore-controlling factors and features of Zhaojinggou Nb-Ta polymetallic deposit [J]. *Metal Mine*, 446(8): 77~95(in Chinese with English abstract).
- Jia Xiaohui, Wang Qiang and Tang Gongjian. 2009. A-type granites: Research progress and implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 465~480(in Chinese with English abstract).
- 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]. *Journal of Petrology*, 38: 371~391.
- Li Zhidan, Chen Junqiang, Wang Jiaying, *et al.* 2016. Geology and geochemistry of the Gonghudong skarn copper deposit in Darhan Muminggan Joint Banner, Inner Mongolia and its significance[J]. *Geology in China*, 43(4): 1367~1384(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Zhai Mingguo, Liu Jianming, *et al.* 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to an orogenic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433~448(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537~571.
- Liu Zhenghong, Xu Zhongyuan and Yang Zhensheng. 2003. Evidence of ^{40}Ar / ^{39}Ar age for the formation age of the Daqingshan thrust[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2193~2197(in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America (Abstracts with Programs)*, 11: 468.

- Ludwig K R. 2003. Users manual for isoplot/Ex (rsv.3.0): A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. Berkley Geochronology Center Special Publication, 1a: 1~55.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.
- Meng Q R. 2003. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? [J]. Tectonophysics, 389(3~4): 155~174.
- Middlemost E A K. 1985. Magmas and Magmatic Rocks[M]. London: Longman, 1~266.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 37: 215~224.
- Nie Fengjun, Wang Fengxiang, Zhao Yuan, *et al.* 2013. Geological features and origin of Zhaojinggou Nb-Ta deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 32(4): 730~743 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1996. Source and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 19: 120~125.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63~81.
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, *et al.* 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2468~2484 (in Chinese with English abstract).
- Scherer E E, Cameron K L and Blichert-Toft J. 2000. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(19): 3413~3432.
- Su Yuping and Tang Hongfeng. 2005. Trace element geochemistry of A-type granites[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24(3): 245~251 (in Chinese with English abstract).
- Sui Zhenmin and Xu Xuechun. 2010. Sr-Nd isotopic characteristics of Jurassic granites in northeastern Da Hinggan Mountains and their geological implications[J]. Geology in China, 37(1): 48~55 (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 processes [J]. Geological Society, Special Publications, 42: 313~345.
- Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E, *et al.* 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. Nature, 379(6566): 624~627.
- Wang F, Zhou X H, Zhang L C, *et al.* 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 251(1~2): 179~198.
- Wang Liang, Wang Genhou, Lei Shibin, *et al.* 2015. Re-Os dating of molybdenites from the Houshihua gold deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia and its geological significance[J]. Geology and Exploration, 51(3): 422~431 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, *et al.* 2011. Pattern and kinematic polarity of Late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes[J]. Tectonics, 30(6): 1~27.
- Wang T, Guo L, Zheng Y D, *et al.* 2012. Timing and processes of Late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes[J]. Lithos, 154: 315~345.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407~419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Lin Qiang, *et al.* 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 15(2): 181~189 (in Chinese with English abstract).
- Wu Suoping, Wang Meiyang and Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A-type granites: A review[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(1): 57~66 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Wang Tao, Deng Jinfu, *et al.* 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: A case study of the formation of key orogen granitoids in China[J]. Geology in China, 36(3): 594~622 (in Chinese with English abstract).
- Yang Liang, Wang Jige and Tian Youjie. 2010. Clastic carbonate rock-type gold deposit-control system and the significance for gold ore-prospecting in Daqingshan area, Inner Mongolia[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 25(3): 206~211 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenrui, Li Ruiqing, Yuan Huabo, *et al.* 2010. Metallogenic geological background and prospecting direction of the gold deposits in Wulashan-Daqingshan region, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 29(Z14): 1011~1012 (in Chinese).
- Yu Reng'an, Zhong Changding, Tang Yongchun, *et al.* 2009. Mineralization geological condition and ore-control factor of the Changfulonggou gold deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia[J]. Geological Survey and Research, 32(1): 27~33 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Yabin, Yuan Shunda, Chen Changjiang, *et al.* 2014. Zircon U-Pb

- ages and Hf isotopes of the granitoids in the Huangshaping mining area and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 64~78(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Qi Xuexiang, Tang Guanzong, *et al.* 2014. Geochemistry and Zircon U-Pb dating for the alkaline porphyries and its constraint on the mineralization in Chang'an Cu-Mo ore concentration region, Ailaoshan orogenic belt, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2 204~2 216(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2013. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for A-type granite: "what is the essence?"[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 267~274(in Chinese with English abstract).
- Zhao G C and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Res.*, 222~223: 13~54.
- Zhao Xinmin, Zhang Zuoheng, Liu Min, *et al.* 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the granites from the Xiaoliugou deposit in the western of the North Qilian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 16~34(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Ouyang Hegen, Wu Xinli, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry study of the biotite granite from the Daolundaba Cu-W polymetallic deposit in the Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 79~94(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柴华, 武景龙. 2013. 内蒙古武川县赵井沟钨钽矿区钠长花岗岩及其成矿作用[J]. *内蒙古科技与经济*, 289(15): 69~71.
- 陈志广, 高帮飞, 黄荣伟, 等. 2012. 内蒙古常福龙金矿床地质特征、成矿模式及其地质意义[J]. *黄金地质*, 33(6): 11~16.
- 高允, 孙艳, 赵芝, 等. 2017. 内蒙古武川县赵井沟钨钽矿多金属矿床白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄及地质意义[J]. *岩矿测试*, 36(5): 551~558.
- 关俊雷, 耿全如, 王国芝, 等. 2014. 北冈底斯带日松花岗岩体的锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素组成[J]. *地质学报*, 88(1): 36~52.
- 侯万荣, 聂凤军, 杜安道, 等. 2011. 内蒙古哈达门沟地区泥盆纪金(钼)矿化事件厘定的同位素证据[J]. *地质论评*, 57(4): 583~590.
- 黄从俊, 王道永, 李泽琴, 等. 2013. 赵井沟钨钽多金属矿床特征及控矿因素分析[J]. *金属矿山*, 446(8): 77~95.
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 33(3): 465~480.
- 李志丹, 陈军强, 王佳营, 等. 2016. 内蒙古达茂旗宫忽洞矽卡岩型铜矿床地质、地球化学特征及其意义[J]. *中国地质*, 43(4): 1 367~1 384.
- 刘洪涛, 翟明国, 刘建明, 等. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山[J]. *岩石学报*, 18(4): 433~448.
- 刘正宏, 徐仲元, 杨振升. 2003. 大青山逆冲推覆构造形成时代的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄证据[J]. *科学通报*, 48(20): 2 193~2 197.
- 聂凤军, 王丰翔, 赵宇安, 等. 2013. 内蒙古赵井沟大型钨钽矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 32(4): 730~743.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 2008. 福建东北沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 24(11): 2 468~2 484.
- 隋振民, 徐学纯. 2010. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类同位素特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 37(1): 48~55.
- 苏玉平, 唐红峰. 2005. A 型花岗岩的微量元素地球化学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 24(3): 245~251.
- 王梁, 王根厚, 雷时斌, 等. 2015. 内蒙武川后石花金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *金属矿产*, 51(3): 422~431.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2): 185~220.
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*, 15(2): 181~189.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩的研究现状及其评述[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 57~66.
- 肖庆辉, 邓晋福, 邱瑞照, 等. 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J]. *中国地质*, 36(3): 594~622.
- 杨亮, 王继革, 田俊杰. 2010. 内蒙古大青山地区碎屑岩型金矿控矿系统及其找矿意义[J]. *地质找矿论丛*, 25(3): 206~211.
- 杨文瑞, 李瑞清, 袁华铎, 等. 2010. 内蒙古乌拉山-大青山地区金矿成矿地质背景及找矿方向[J]. *矿床地质*, 29: 1 011~1 012.
- 俞初安, 钟长汀, 唐永春, 等. 2009. 内蒙古武川县常福龙金矿成矿地质条件及控矿因素[J]. *地质调查与研究*, 32(1): 27~33.
- 原亚斌, 袁顺达, 陈长江, 等. 2014. 黄沙坪矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *岩石学报*, 30(1): 64~78.
- 张超, 戚学祥, 唐贯宗, 等. 2014. 滇西哀牢山构造带长安铜钼金矿集区碱性斑岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年及其对成矿作用的约束[J]. *岩石学报*, 30(8): 2 204~2 216.
- 张旗. 2013. A 型花岗岩的标志和判别[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(2): 267~274.
- 赵辛敏, 张作衡, 刘敏, 等. 2014. 北祁连西段小柳沟矿区花岗质岩石锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J]. *岩石学报*, 30(1): 16~34.
- 周振华, 欧阳荷根, 武新丽, 等. 2014. 内蒙古道伦达坝铜钼多金属矿黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 30(1): 79~94.