

文章编号: 0258-7106 (2023) 02-0253-14

Doi: 10.16111/j.0258-7106.2023.02.002

# 柴北缘阿日特克山铜钼矿床成矿岩体中黑云母和角闪石矿物学特征及其指示意义<sup>\*</sup>

唐名鹰<sup>1,2,3</sup>, 丁正江<sup>1,3\*\*</sup>, 彭永和<sup>2,4</sup>, 陈建<sup>2,4</sup>, 张琪彬<sup>3</sup>, 朱伟<sup>2,4</sup>, 朱海波<sup>2,4</sup>,  
马登贤<sup>2,4</sup>, 孙晓亮<sup>2,4</sup>

(1 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000; 2 山东省第八地质矿产勘查院, 山东 日照 276800; 3 自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心, 山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室, 山东省第六地质矿产勘查院, 山东 威海 264209; 4 山东省地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 山东 日照 276800)

**摘要** 阿日特克山铜钼矿床位于青海柴北缘成矿带中北部, 为宗务隆构造带新发现的矽卡岩型-斑岩型矿床, 矿床隐伏斑岩体中广泛发育黑云母, 部分地段还发育角闪石。文章在野外地质工作的基础上, 对花岗闪长(斑)岩进行了详细的岩相学研究和黑云母、角闪石成分的电子探针原位分析, 初步探讨了成岩过程中的物理化学条件、成岩物质来源及其对成岩成矿的指示作用。电子探针结果显示, 花岗闪长(斑)岩中黑云母主要为镁质黑云母, 具有高 Mg、Ti、K、Fe, 低 Ca、Na 的特点; 角闪石为镁质普通角闪石, 表现为富 Si、Mg、Ca, 低 Ti、Na、K 的特征。黑云母和角闪石温度计算结果显示, 花岗闪长(斑)岩中黑云母结晶温度为 632~736°C(平均 696°C), 角闪石结晶温度为 737~764°C(平均 749°C); 在黑云母和角闪石同时存在的花岗闪长岩中计算的岩体侵位压力为 81~180 MPa, 深度为 3.07~6.82 km, 为中深成斑岩体。黑云母和角闪石矿物化学特征指示花岗闪长(斑)岩属于钙碱性岩系 I 型花岗岩, 具有壳幔混源的特征。岩体中黑云母、角闪石具有较高的结晶温度, 其结晶的岩浆具有高的氧逸度及水含量, 显示良好的成矿性, 指示该地区具有寻找大型斑岩矿床的潜力。

**关键词** 地质学; 角闪石; 黑云母; 矿物学特征; 阿日特克山铜钼矿床; 柴北缘

中图分类号:P618.41; P618.65

文献标志码:A

## Mineralogical characteristics of hornblendes and biotites in ore-forming porphyry from Aritekeshan Cu-Mo deposit in northern Qaidam Basin and their significance

TANG MingYing<sup>1,2,3</sup>, DING ZhengJiang<sup>1,3</sup>, PENG YongHe<sup>2,4</sup>, CHEN Jian<sup>2,4</sup>, ZHANG QiBin<sup>3</sup>, ZHU Wei<sup>2,4</sup>,  
ZHU HaiBo<sup>2,4</sup>, MA DengXian<sup>2,4</sup> and SUN XiaoLiang<sup>2,4</sup>

(1 School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China;  
2 No.8 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276800, Shandong, China; 3 Ministry of Natural Resources Technology Innovation Center for Deep Gold Resources Exploration and Mining, Engineering Laboratory of Deep Gold Exploration Big Data Application and Development, No. 6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China; 4 Key Laboratory of Non-ferrous Metals Mining and Resource Evaluation in Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276800, Shandong, China)

### Abstract

The Aritekeshan Cu-Mo deposit is located in the central part of the northern margin of Qaidam Metallogenic

\* 本文得到山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室开放课题(编号:SDK202205)和山东省地矿局控地质勘查与科技创新项目(编号:202013)联合资助

第一作者简介 唐名鹰,男,1990 年生,工程师,主要从事区域地质调查与矿产勘查工作。Email: 353635085@qq.com

\*\* 通讯作者 丁正江,男,1977 年生,博士,研究员,主要从事区域成矿作用、成矿规律及成矿预测研究。Email:ytdzhj@126.com

收稿日期 2022-04-11; 改回日期 2023-03-06。张绮玲编辑。

belt, Qinghai Province. It is a newly-identified skarn-porphyry deposit in the Zongwulong tectonic belt. In this paper, based on the detailed geological work in the field, the petrographic study of the granodiorite (porphyry) and the in-situ electron probe micro analysis (EPMA) of biotite and hornblende are carried out, and the physical and chemical conditions during magma emplacement, the source of rock-forming materials and their indication to mineralization are discussed. The EPMA results show that the biotite in granodiorite is mainly magnesium biotite with high Mg, Ti, K, Fe and low Ca, Na. The amphibole belongs to magnesium hornblende that is rich in Si, Mg, Ca and low in Ti, Na, K. The estimated results of biotite and hornblende thermometers show that biotite and hornblende in granodiorite crystallized at 632~736°C (average 696°C) and 737~764°C (average 749°C), respectively. The calculated emplacement pressure of the granodiorite from biotite and hornblende barometers is 81~180 MPa, equivalent to a depth of 3.07~6.82 km, indicating that the granodiorite formed at a medium-deep depth. The chemical characteristics of biotite and hornblende indicate that the granodiorite belongs to calc-alkaline I-type granite, which potentially reflected a crust-mantle interaction process. The biotite and hornblende geochemical analysis data in the ore-forming porphyry show good mineralization condition, including high mineralization temperature, high oxygen fugacity and water abundance, which indicate that the area might have prospecting potential for large-size porphyry deposits.

**Key words:** geology, hornblende, biotite, mineralogical characteristics, Aritekeshan Cu-Mo deposit, northern Qaidam Basin

宗务隆构造带作为青海柴北缘重要的地质构造单元,其成矿地质条件良好,目前已发现铅锌、铜、金及稀有矿床(点)30余处,代表性矿床有蓄集小型铅锌矿床(陈敏等,2020)、阿日特克山小型铜钼矿床(朱德全等,2020)、京根郭勒金铅锌矿点(付彦文等,2018)等。前人工作发现,宗务隆构造带内成矿规模均较小,已进行的区域成矿研究多集中于构造-岩浆演化和成矿作用(彭渊等,2016;陈敏,2020),矿床研究仅限于矿床地质特征、成矿物质来源以及成矿流体演化等方面(付彦文等,2018;朱德全等,2020;陈敏等,2020;唐名鹰等,2021),与成矿作用相关的花岗质岩浆中矿物学特征及物理化学条件研究薄弱,这在一定程度上制约了花岗岩成岩作用的研究以及对成矿意义的评价。前人研究表明,花岗岩结晶时温度和压力、氧逸度、含水量等物理化学条件对金属成矿元素在熔体和流体中的迁移、分配,以及成岩成矿作用具有重要的影响(李鸿利等,2007;张德会,2015),因此,岩石矿物成分及组合的分析研究对深入认识花岗岩的形成和演化具有重要的指示意义。黑云母和角闪石作为花岗岩中的造岩矿物,其化学组成可在一定程度上反演岩浆演化特征、岩浆源区性质和构造环境等,同时对于矿床成因、成矿物质来源及演化具有重要指示作用(Wones et al., 1965; Hammarstrom et al., 1986; Abdel-Rahman, 1994; Henry et al., 2005; Ridolfi et

al., 2008; 2010; 豆敬兆等,2015)。

阿日特克山铜钼矿床为矽卡岩型-斑岩型矿床,前人研究表明铜钼矿体产于花岗闪长(斑)岩岩体内部和与地层接触部位的矽卡岩中,辉钼矿 Re-Os 测年结果与成岩年龄一致,为早-中三叠世(~250 Ma, 朱德全等,2020)。流体包裹体及稳定同位素研究显示成矿流体以混合流体为主,主成矿期流体为中高温、中盐度的  $H_2O-NaCl \pm CO_2$  体系(唐名鹰等,2021),二叠纪—三叠纪柴北缘古特提斯洋北向俯冲和宗务隆有限洋盆向南俯冲以及区域构造的作用是该矿床成岩岩体形成的主要因素(彭渊等,2016;陈敏等,2020)。因此,在野外地质工作的基础上,本文选取阿日特克山矿区隐伏花岗闪长(斑)岩中黑云母、角闪石作为研究对象,对岩相学、矿物学进行研究,初步探讨了成岩过程中的物理化学条件、成岩物质来源及其对成岩成矿的指示作用,为宗务隆构造带二叠纪—三叠纪花岗岩找矿潜力评价工作提供重要数据支撑。

## 1 矿区和矿床地质

阿日特克山铜钼矿床地处柴北缘成矿带之欧龙布鲁克-乌兰钨(铁、铋、稀有元素、稀土元素、宝玉石)成矿亚带,位于秦祁昆造山系之欧龙布鲁克微陆块构造单元与宗务隆构造带结合部位(图 1a)

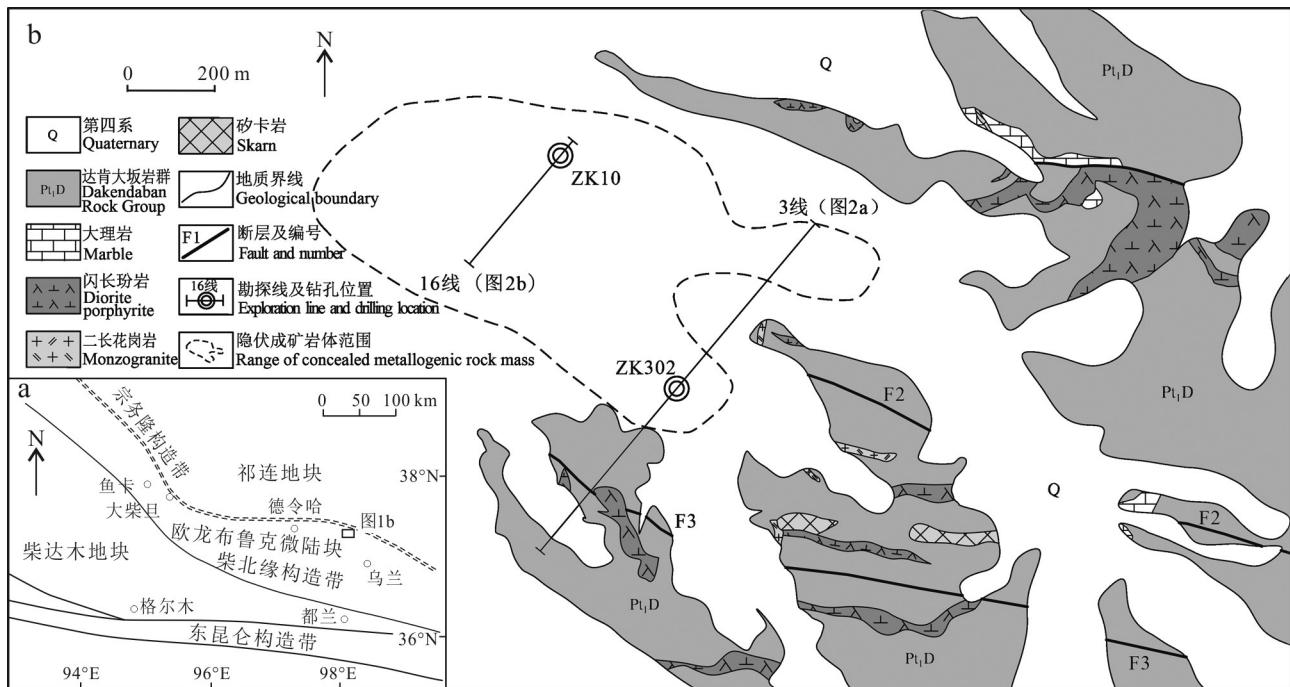


图1 阿日特克山区域大地构造图(a, 据 Wang et al., 2017) 及矿区地质图(b, 据莫延强等, 2019)

Fig.1 Geotectonic (a, after Wang et al., 2017) and geological map (b, after Mo et al., 2019) of the Aritekeshan area

(潘彤, 2006; 2017; 祁生胜, 2013)。区域内出露地层为古元古界达肯大坂岩群, 为一套层状无序的中-深变质岩系, 可进一步划分为片麻岩组、片岩组以及局部产出的条带、透镜状大理岩, 地层总体走向为北西-北北西向, 倾向南或南西, 局部北倾, 倾角一般大于40°, 区内盖层为第四系冲积物(图1b)。区域内断裂发育较少, 主要有北西西向构造3组(F1~F3), 构造整体走向与区域上霍得生沟断裂产状基本一致, 另外, 发育少量的北北东向次级断裂, 规模较小。

区域内地表出露岩体较少, 主要为小型岩株、岩脉产出的闪长玢岩、二长花岗岩, 阿日特克山花岗闪长(斑)岩体位于矿区中部第四系覆盖区内, 为隐伏斑岩体。根据深部钻孔揭露, 岩体整体呈北西—北北西向展布, 在3勘查线及以西各钻孔中均可见(图1b、图2)。

阿日特克山矿床分布在花岗闪长(斑)岩内部及与地层接触的矽卡岩中, 为近年来新发现的矽卡岩型-斑岩型矿床, 目前已提交深部400 m以浅铜钼多金属资源量3万吨(高会卿等, 2020)。近年来, 随着主矿区及外围找矿工作的进一步开展, 钻探工程显示浅部成矿斑岩体(岩帽)多处分布, 测井数据亦显示良好的极化异常, 对进一步寻找深

部斑岩体和潜在的斑岩富矿中心具有较好的指示意义。

已有工程揭露显示, 阿日特克山铜钼矿体主要赋存于花岗闪长(斑)岩中, 矿体呈似层状、透镜状产出, 沿倾向方向及深部变薄或分支尖灭(图2b), 辉钼矿产于张性节理石英脉中, 多呈细脉状分布, 常与黄铁矿、黄铜矿共生, 热液蚀变主要有硅化、钾长石化、高岭土化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化等。铜多金属矿体多分布在花岗闪长(斑)岩岩体与古元古界达肯大坂岩群大理岩接触带透辉矽卡岩中(图2a), 常伴有断裂构造, 金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等, 脉石矿物主要有透辉石、透闪石、绿泥石、石英等, 热液蚀变发育矽卡岩化、绿泥石化(唐名鹰等, 2021)。

## 2 样品特征及分析方法

本次研究采取的岩石样品为阿日特克山矿区与成矿关系密切的花岗闪长(斑)岩, 位于钻孔ZK10、ZK302所揭露的隐伏斑岩体深部, 采样位置见图2。花岗闪长岩呈灰色, 细粒花岗结构, 块状构造(图3a)。粒径0.2~2 mm不等, 主要由斜长石

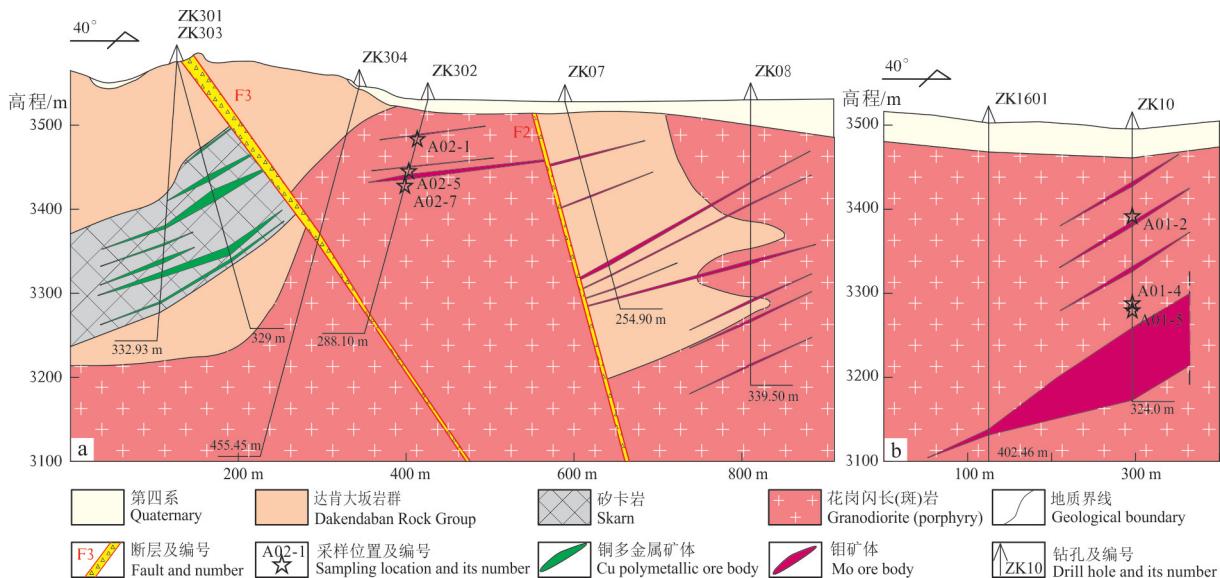


图2 阿日特克山铜钼矿床3勘探线(a,据莫延强等,2019)和16勘探线地质剖面图(b,据朱德全等,2020)

Fig.2 Geological section at prospecting line 3 (a, after Mo et al., 2019) and prospecting line 16 (b, after Zhu et al., 2019) of the Aritekeshan Cu-Mo deposit

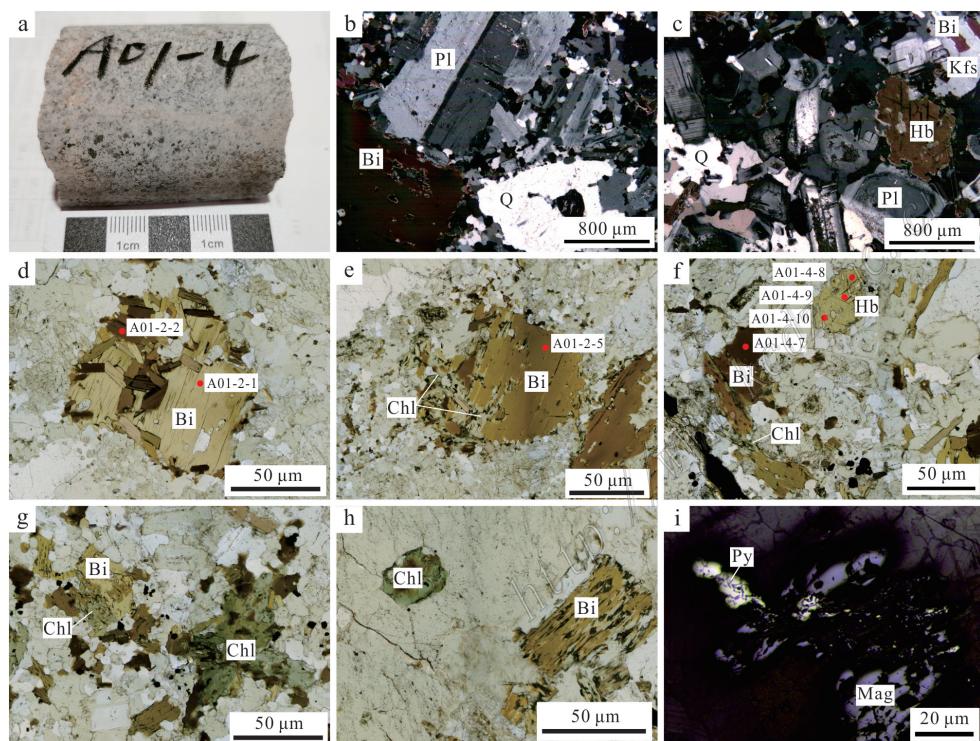


图3 阿日特克山花岗闪长(斑)岩岩芯及显微照片

a. 花岗闪长岩手标本; b. c. 花岗闪长(斑)岩显微照片; d~h. 花岗闪长(斑)岩黑云母、角闪石、绿泥石镜下特征及电子探针位置分布;

i. 镜下磁铁矿、黄铁矿照片

Q—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bi—黑云母; Hb—角闪石; Chl—绿泥石; Py—黄铁矿; Mag—磁铁矿

Fig.3 Core and thin-section photographs of the Aritekeshan granodiorite (porphyry)

a. Granodiorite hand specimen; b, c. Micrograph of granodiorite (porphyry); d~h. Microscopic characteristics and electron probe location distribution of biotite, amphibole and chlorite in granodiorite. i. Microscopic photographs of magnetite and pyrite

Q—Quartz; Pl—Plagioclase; Kfs—K-feldspar; Bi—Biotite; Hb—Hornblende; Chl—Chlorite; Py—Pyrone; Mag—Magnetite

(55%~60%)、钾长石(10%~15%)、石英(20%~25%)、黑云母(5%~10%)及少量角闪石(0%~<5%)组成(图3b、3c)。其中斜长石呈半自形板状,常见聚片双晶、卡钠复合双晶(图3b),部分可见环带(图3c),多被绢云母及方解石、黝帘石交代;钾长石呈半自形-他形粒状,星散状分布;石英多为他形粒状,填隙状分布,表面较新鲜干净;黑云母呈不规则板状、片状产出,为淡黄色-红褐色,星散状分布(图3d~h),局部被绿泥石交代(图3e~h);角闪石呈半自形柱状产出,星散状分布,局部被黑云母及绿泥石交代(图3f)。花岗闪长斑岩呈灰色,斑状一基质微细粒花岗结构,块状构造,由斑晶和基质两部分组成,其中斑晶为0.5~1 mm,含量为30%~40%,基质粒度为0.05~0.2 mm,含量为60%~70%,斑状花岗闪长岩岩石组成及特征与花岗闪长岩基本一致,岩石中角闪石不发育。不透明矿物以黄铁矿及少量磁铁矿为主(<1%)(图3i),偶见辉钼矿、黄铜矿等。

将采集的花岗闪长(斑)岩样品磨制成探针片,经显微镜下详细观察后,选取有代表性的矿物颗粒进行电子探针主量成分分析。探针片的喷碳与样品测试工作均在北京燕都中实测试技术有限公司测试完成,试验中矿物化学成分分析采用日本电子JOEL公司生产的JXA-8230型电子探针分析仪,实验中的加速电压为15 kV,束流为 $2.0 \times 10^{-8}$  A,束斑大小为5 μm。主量元素(标样矿物)分别是:磷灰石(F、P、Ca)、刚玉(Al、Si、Na)、钾长石(K)、磷灰石(P)、氯化钠(合成)(Cl)、重晶石(S)、磁铁矿(Fe)、镁橄榄石(Mg)和金红石(Ti)等。

### 3 分析结果

阿日特克山花岗闪长(斑)岩中代表性黑云母和角闪石电子探针成分分析结果见表1和表2。黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值采用林文蔚等(1994)计算方法获得,黑云母和角闪石分别以22和23个氧原子为基础计算矿物中阳离子系数及相关参数。

#### 3.1 黑云母

阿日特克山花岗闪长(斑)岩中黑云母中氧化物总质量分数位于93.02%~96.13%之间(表1),均在含水矿物黑云母电子探针数据的允许误差之内。黑云母中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为14.59%~18.27%, $w(\text{MgO})$ 为9.12%~11.17%, $w(\text{TFeO})$ 为13.98%~20.67%, $w(\text{TiO}_2)$

为2.32%~3.91%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为8.87%~9.40%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为0.09%~0.19%,总体表现为高Mg、Ti、K、Fe,低Ca、Na的特点。根据黑云母成分分类图(图4a),样品大部分位于镁质黑云母区间内,5件样品位于铁质黑云母与镁质黑云母界线处。

黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ 比值为0.31~0.52,表明样品未受后期的热液流体改造(Stone, 2000),指示了其岩浆成因; $w(\text{CaO})$ 大部分为0(1个值为0.01%),表明样品未受到大气降水或绿泥石化、碳酸盐化的影响(Kumar et al., 2010)。在黑云母 $10\text{TiO}_2\text{-}\text{FeO}-\text{MgO}$ 图解(图4b)中,投点大多数落在岩浆黑云母范围内,少数位于岩浆黑云母与重结晶黑云母界线区域,暗示原生岩浆黑云母受到了后期轻度的次生改造作用。

#### 3.2 角闪石

阿日特克山岩体中仅花岗闪长岩(A01-4)中发育角闪石,所测试角闪石(表2)中, $w(\text{SiO}_2)$ 为49.30%~50.91%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为4.67%~5.87%, $w(\text{MgO})$ 为14.14%~15.00%, $w(\text{TFeO})$ 为12.45%~13.53%, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.42%~0.63%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为0.28%~0.38%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为0.64%~0.70%, $w(\text{CaO})$ 为11.07%~11.19%,整体表现为富Si、Mg、Ca,低Ti、Na、K的特点。

角闪石23个氧原子为基础计算矿物中阳离子系数中, $(\text{Ca}_B + \text{Na}_B)$ 值为1.92~1.95,且 $\text{Na}_B$ 值为0.18~0.20,根据角闪石分类方案(Leake et al., 1997),该区角闪石均属于钙质角闪石亚类 $[(\text{Ca}_B + \text{Na}_B) > 1]$ ,且 $\text{Na}_B < 0.50$ ,一般 $\text{Ca}_B \geq 1.50$ ]。根据 $(\text{Na}_A + \text{K}_A)$ 值0.05~0.07(<0.5的要求),结合角闪石分类图解(图5),判断成矿花岗闪长岩中角闪石均为镁质普通角闪石。

### 4 讨论

#### 4.1 岩浆结晶的物理化学条件

花岗质岩石形成的矿物中元素成分特征,可为岩浆在演化过程中矿物结晶形成时的温度、压力、氧逸度等物理化学条件提供重要的信息(Speer, 1984; Temizel et al., 2004)。

##### 4.1.1 温度和压力估算

阿日特克山岩体中黑云母电子探针 $w(\text{CaO})$ 及 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ 比值均显示黑云母未受到绿泥石化、碳酸盐化的影响,为典型的岩浆成因黑云母(Kumar et al., 2010; 唐攀等, 2017),这与岩相学观

表1 阿日特克山花岗闪长(斑)岩黑云母电子探针分析结果( $w(\text{B})/\%$ )Table 1 EPMA data of the biotites from the Aritekeshan granodiorite (porphyry) ( $w(\text{B})/\%$ )

组分	花岗闪长斑岩					花岗闪长岩					花岗闪长斑岩									
	A01-2					A01-4			A01-5		A02-1				A02-5			A02-7		
	1	2	3	4	5	2	4	7	1	2	1	2	3	4	1	2	2	4	5	
SiO <sub>2</sub>	37.12	36.56	36.99	36.88	37.16	37.41	37.31	37.46	37.88	37.66	36.35	37.16	36.30	36.48	35.61	36.40	36.11	35.79	35.73	
TiO <sub>2</sub>	3.46	3.49	3.73	3.97	3.44	3.10	3.01	3.06	3.20	3.25	2.94	3.10	3.03	2.93	2.52	2.89	2.32	2.83	3.00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.33	15.88	15.42	15.66	15.77	14.75	14.59	15.21	16.37	16.35	17.00	16.20	16.80	17.05	17.72	17.32	18.27	17.38	17.37	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0	0	0.02	0.04	0.06	0	0	0.02	0.02	0.05	0.09	0.43	0.03	0.01	0.09	0.05	0.08	0.06	
<sup>T</sup> FeO	16.40	15.85	16.41	16.35	15.88	15.68	17.14	14.67	14.38	13.98	18.55	17.71	17.99	18.25	17.80	19.89	19.76	20.65	20.67	
MnO	0.21	0.20	0.13	0.26	0.19	0.29	0.50	0.19	0.28	0.22	0.24	0.20	0.21	0.21	0.19	0.21	0.23	0.24	0.23	
MgO	13.23	12.62	12.81	12.54	13.05	13.26	13.44	14.11	13.63	14.17	10.67	10.99	9.90	10.32	9.46	9.61	9.35	9.15	9.12	
CaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.14	0.11	0.15	0.15	0.12	0.10	0.12	0.12	0.12	0.11	0.15	0.09	0.13	0.13	0.12	0.12	0.14	0.19	
K <sub>2</sub> O	9.35	8.92	9.24	9.28	9.07	9.11	9.02	9.01	9.26	9.15	9.24	8.87	9.08	9.13	9.12	9.37	9.40	9.17	9.06	
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0	0.25	0	0	
Cl	0.12	0.13	0.11	0.12	0.12	0.11	0.16	0.13	0.08	0.08	0.16	0.16	0.15	0.16	0.18	0.17	0.18	0.20	0.18	
总和	95.35	93.79	94.95	95.23	94.87	93.89	95.27	93.96	95.22	95.01	95.31	94.63	93.98	94.69	93.07	96.07	96.04	95.63	95.61	
基于22个氧原子计算的阳离子数																				
Si	5.58	5.57	5.58	5.55	5.59	5.69	5.64	5.65	5.63	5.59	5.52	5.64	5.58	5.56	5.54	5.52	5.48	5.48	5.47	
Ti	0.39	0.40	0.42	0.45	0.39	0.35	0.34	0.35	0.36	0.36	0.34	0.35	0.35	0.34	0.29	0.33	0.26	0.33	0.34	
Al	2.72	2.85	2.74	2.78	2.80	2.64	2.60	2.71	2.86	2.86	3.04	2.90	3.04	3.06	3.25	3.10	3.27	3.13	3.13	
Al <sup>IV</sup>	2.42	2.43	2.42	2.45	2.41	2.31	2.36	2.35	2.37	2.41	2.48	2.36	2.42	2.44	2.46	2.48	2.52	2.52	2.53	
Al <sup>VI</sup>	0.30	0.42	0.33	0.33	0.39	0.33	0.24	0.36	0.49	0.46	0.56	0.54	0.62	0.62	0.79	0.61	0.75	0.61	0.60	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.05	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	
Fe <sup>2+</sup>	1.73	1.67	1.72	1.71	1.65	1.65	1.83	1.53	1.46	1.42	1.98	1.85	1.91	1.93	1.92	2.12	2.12	2.24	2.24	
Fe <sup>3+</sup>	0.32	0.34	0.33	0.34	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31	0.36	0.38	0.38	0.37	0.37	0.38	0.37	0.38	0.38	
Mn	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.06	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
Mg	2.97	2.87	2.88	2.81	2.93	3.01	3.03	3.17	3.02	3.14	2.42	2.49	2.27	2.35	2.19	2.17	2.12	2.09	2.08	
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.06	
K	1.79	1.73	1.78	1.78	1.74	1.77	1.74	1.73	1.75	1.74	1.79	1.72	1.78	1.77	1.81	1.81	1.82	1.79	1.77	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.12	0.00	0.00	
Cl	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	
XMg	0.59	0.59	0.58	0.58	0.59	0.60	0.58	0.63	0.63	0.64	0.51	0.53	0.50	0.50	0.49	0.46	0.46	0.44	0.44	
Fe <sup>2+)/(Fe<sup>2+</sup>+Mg)</sup>	0.37	0.37	0.37	0.38	0.36	0.35	0.38	0.32	0.33	0.31	0.45	0.43	0.46	0.45	0.47	0.49	0.50	0.52	0.52	
MF	0.59	0.59	0.58	0.58	0.59	0.60	0.58	0.63	0.63	0.64	0.51	0.52	0.49	0.50	0.49	0.46	0.46	0.44	0.44	
Mg#	0.63	0.63	0.62	0.62	0.64	0.64	0.62	0.67	0.67	0.68	0.55	0.57	0.54	0.54	0.53	0.50	0.50	0.48	0.48	
氧化系数	0.16	0.17	0.16	0.16	0.17	0.16	0.15	0.17	0.18	0.18	0.15	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	
t/°C	721	723	729	736	721	710	700	716	718	725	680	692	685	679	656	669	632	664	673	
p/MPa	170	210	178	189	194	148	135	167	215	214	269	225	268	275	331	285	338	297	296	
log(O <sub>2</sub> )	-11.39	-11.47	-11.62	-11.76	-11.28	-11.04	-11.47	-9.60	-9.78	-9.06	-13.21	-12.81	-13.54	-13.30	-13.70	-14.12	-14.21	-14.49	-14.51	

注:比值单位为1。

表2 阿日特克山花岗闪长岩角闪石电子探针分析结果( $w(\text{B})/\%$ )  
Table 2 EPMA data of the hornblendes from the Aritekeshan granodiorite ( $w(\text{B})/\%$ )

组分	花岗闪长岩(A01-4)					组分	花岗闪长岩(A01-4)								
	5	6	8	9	10		5	6	8	9	10				
$\text{SiO}_2$	49.96	50.39	50.91	50.27	49.30	基于23个氧原子计算的阳离子数									
$\text{TiO}_2$	0.42	0.53	0.49	0.58	0.63	$\text{Fe}^{2+}$	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03				
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5.50	4.99	4.67	5.06	5.87	Mn	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12				
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.02	0	0.02	0.02	0.03	Ca	1.74	1.74	1.73	1.74	1.75				
$\text{TFeO}$	13.15	12.88	12.50	12.45	13.53	Na	0.20	0.18	0.20	0.19	0.20				
$\text{MnO}$	0.96	0.94	0.91	0.99	0.94	sum B	2.10	2.07	2.08	2.08	2.10				
$\text{MgO}$	14.56	14.43	15.00	14.63	14.14	Na	0	0	0	0	0				
$\text{CaO}$	11.16	11.09	11.07	11.07	11.19	K	0.07	0.07	0.05	0.07	0.07				
$\text{Na}_2\text{O}$	0.70	0.64	0.70	0.68	0.69	sum A	0.07	0.07	0.05	0.07	0.07				
$\text{K}_2\text{O}$	0.38	0.35	0.28	0.37	0.37	总和	15.17	15.14	15.13	15.15	15.17				
F	0	0.11	0	0	0.00	F	0	0.05	0	0	0				
Cl	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				
总和	96.86	96.39	96.59	96.16	96.73	Si*	8.49	8.58	8.61	8.55	8.43				
基于23个氧原子计算的阳离子数															
Si	7.28	7.38	7.41	7.36	7.21	$\text{Al}^{\text{I}}$	0.94	0.86	0.80	0.87	1.01				
$\text{Al}^{\text{IV}}$	0.72	0.62	0.59	0.64	0.79	$\text{Mg}^*$	3.59	3.55	3.66	3.58	3.49				
sum T	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	$\text{Al}^*$	-1.35	-1.36	-1.41	-1.38	-1.30				
$\text{Al}^{\text{VI}}$	0.23	0.25	0.21	0.24	0.22	$\text{Mn}^*$	0.21	0.20	0.18	0.21	0.21				
Ti	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	$t^{\circ}\text{C}$	755	742	737	746	764				
$\text{Fe}^{3+}$	0.32	0.22	0.25	0.24	0.35	$p/\text{MPa}$	149	109	81	115	180				
Mg	3.16	3.15	3.26	3.20	3.08	深度/km	5.61	4.12	3.04	4.35	6.82				
$\text{Fe}^{2+}$	1.24	1.32	1.23	1.26	1.27	$\Delta \text{NNO}$	1.89	1.83	2.00	1.87	1.73				
sum C	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	$\log(f(\text{O}_2))$	-12.94	-13.34	+13.30	-13.20	-12.89				
						$\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}/\%$	5.23	5.19	4.91	5.09	5.52				

注:标\*值由 Ridolfi et al., 2010方法计算。比值单位为1。

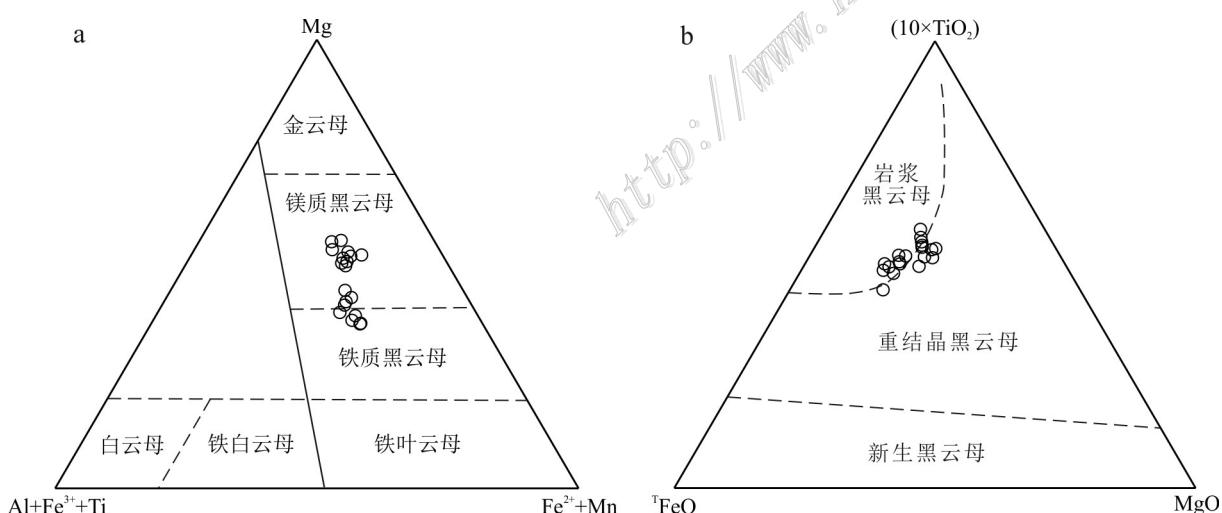


图4 阿日特克山花岗闪长(斑)岩中黑云母分类图解(a,据Foster, 1960)和10 $\text{TiO}_2$ - $\text{FeO}$ - $\text{MgO}$ 图解(b,据Nchit et al., 2005)

Fig. 4 Classification (a, after Foster, 1960) and 10 $\text{TiO}_2$ - $\text{FeO}$ - $\text{MgO}$  (b, after Nchit et al., 2005) diagram of the biotite from the Aritekeshan granodiorite (porphyry)

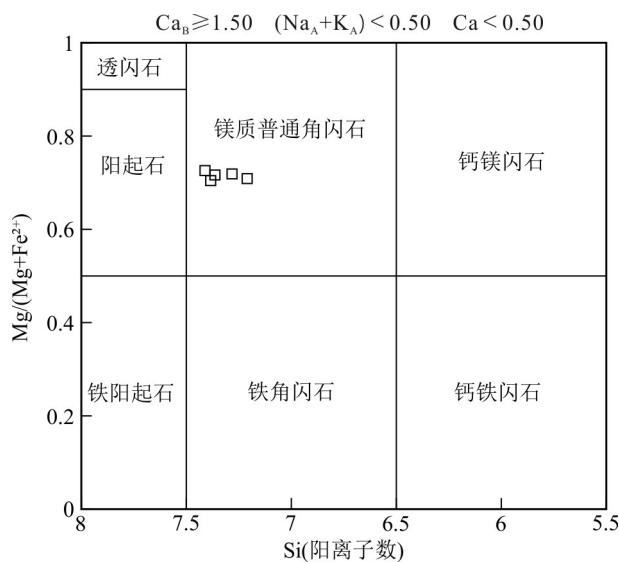


图 5 阿日特克山花岗闪长岩中角闪石分类图解(据 Leake et al., 1997)

Fig.5 Classification diagram of the hornblendes from the Aritekeshan granodiorite (after Leake et al., 1997)

测相一致。

根据 Henry 等(2005)提出的黑云母 Ti 温度计公式: $t=[\ln(\text{Ti})-a-c(X_{\text{Mg}})^3]/b\}^{0.333}$ ( $t$ 的单位为°C, Ti 表示黑云母阳离子数中 Ti 的含量,  $X_{\text{Mg}}=\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ ,  $a=-2.3594$ ,  $b=4.6482 \times 10^{-9}$ ,  $c=-1.7283$ ), 所计算数值中  $X_{\text{Mg}}=0.275 \sim 1.000$ ,  $\text{Ti}=0.04 \sim 0.60$ ,  $t=400 \sim 800^\circ\text{C}$  为准确的校正范围。本次估算出阿日特克山斑岩体中黑云母的结晶温度主要介于  $632 \sim 736^\circ\text{C}$ , 平均  $696^\circ\text{C}$  (图 6)。

角闪石结晶温度采用 Ridolfi 等(2010)提出的温度校正公式进行计算: $t=-151.487\text{Si}^*+2041$ 。估算得到花岗闪长岩中角闪石结晶温度为  $737 \sim 764^\circ\text{C}$  (表 2), 平均为  $749^\circ\text{C}$ 。

本次估算获得角闪石结晶温度为  $737 \sim 764^\circ\text{C}$  (平均  $749^\circ\text{C}$ ), 相对比黑云母结晶温度  $632 \sim 736^\circ\text{C}$  (平均  $696^\circ\text{C}$ ) 略高, 这可能与岩浆冷凝结晶过程中角闪石先于黑云母结晶有关, 由于矿物结晶过程贯穿于岩浆结晶的整个过程, 可认为本区成矿斑岩的岩浆固结温度大致在  $632 \sim 764^\circ\text{C}$ 。

康志强等(2010)在研究中指出, 对于花岗岩成岩压力的计算中, 当花岗岩中存在角闪石+黑云母矿物组合且角闪石结晶完好时, 则选择角闪石作为全铝压力计矿物; 当角闪石结晶不够完好, 黑云母结晶完好时, 则选择黑云母作为全铝压力计矿物; 而在花

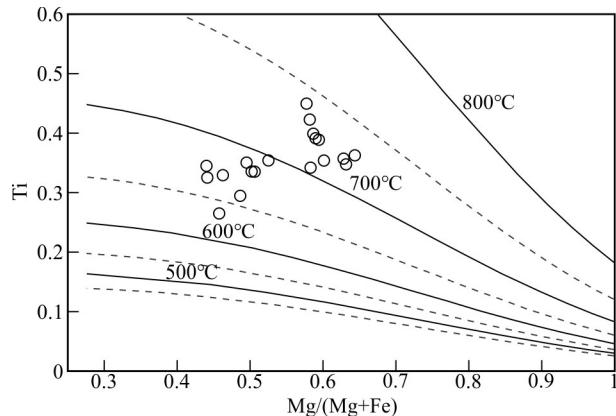


图 6 阿日特克山花岗闪长(斑)岩黑云母 Ti-Mg/(Mg+Fe) 图解(据 Henry et al., 2005)

Fig.6 Ti-Mg/(Mg+Fe) diagram of the biotites from the Aritekeshan granodiorite(porphyry) (after Henry et al., 2005)

岗岩中不存在角闪石时, 黑云母也不适合作为全铝压力计。本次研究采取的样品中, 仅有 A01-4 样品花岗闪长岩中存在角闪石和黑云母共生, 其余花岗闪长(斑)岩中仅发育黑云母, 因此在对成岩压力计算时, 仅采用 A01-4 样品。

角闪石采用 Schmidt(1992)提出的角闪石全铝压力计公式进行计算, 即: $p(\times 100 \text{ MPa})=4.76\text{Al}^T-3.01$ , 求得角闪石压力为  $81 \sim 180 \text{ MPa}$  (平均值  $127 \text{ MPa}$ ) (表 2), 形成深度采用公式  $p=\rho g D$  计算,  $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ ,  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ , 得出角闪石形成深度为  $3.04 \sim 6.82 \text{ km}$  (平均  $4.79 \text{ km}$ )。黑云母利用 Uchida 等(2007)提出的压力计算公式进行计算, 即: $p(\times 100 \text{ MPa})=3.03 \times \text{Al}^T-6.53$ , 求得黑云母结晶压力为  $135 \sim 167 \text{ MPa}$  (平均值  $150 \text{ MPa}$ ) (表 1), 对应的深度为  $5.09 \sim 6.31 \text{ km}$  (平均  $5.66 \text{ km}$ )。利用角闪石和黑云母估算岩体的侵位压力在误差允许范围内一致, 显示阿日特克山成岩岩体侵位深度较深( $3.04 \sim 6.82 \text{ km}$ ), 为中深成岩体。

#### 4.1.2 氧逸度

阿日特克山岩体岩相学特征表明, 除黑云母、角闪石外, 还发育钾长石、石英及少量磁铁矿(图 3), 符合氧逸度计算的条件。

根据黑云母  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$  图解(图 7a), 阿日特克山斑岩中黑云母样品点均落在  $\text{Ni}-\text{NiO}$  与  $\text{Fe}_3\text{O}_4-\text{Fe}_2\text{O}_3$  两条缓冲线之间且更偏向于  $\text{Ni}-\text{NiO}$  缓冲线, 同时根据 Wones 等(1965)提出的在  $p(\text{H}_2\text{O})=207 \text{ MPa}$  的条件下黑云母  $\log f(\text{O}_2)-t$  图解(图 7b), 结合上述研究得到的黑云母结晶温度。阿日特克山岩体中

黑云母投影点位于HM和NNO缓冲线之间,与黑云母 $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ -Mg图解所获结果一致,指示黑云母形成于较高氧逸度环境。

角闪石可通过 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值对氧逸度 $f(\text{O}_2)$ 进行计算,通过Ridolfi等(2008)提出的 $\Delta\text{NNO}=1.644\text{Mg}^*-4.01$ 公式计算出花岗闪长岩中角闪石结晶时氧逸度变化范围在 $\Delta\text{NNO}+1.73$ 到 $\Delta\text{NNO}+2.00$ 之间(表2),平均为 $\Delta\text{NNO}+1.86$ (图8a)。另外,角闪石的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ 比值为0.28~0.30,在 $[\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})]-\text{Al}^{\text{IV}}$ 图解(图8b)中位于高氧逸度区间内,上述研究均表明角闪石形成于较高的氧逸度环

境(张忠坤等,2020),与黑云母反映的岩浆高氧逸度结果是一致的。

#### 4.2 成岩岩体岩石类型

成岩矿物中黑云母和角闪石的元素组成特征可以指示花岗岩成岩类型及成因(Wones et al., 1965; Abdel, 1994)。阿日特克山花岗闪长(斑)岩中角闪石呈自形,反映其为岩浆结晶,角闪石Ti值为0.26~0.45, $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 值为0.70~0.72,指示I型花岗岩特征(张东阳等,2009)。徐克勤等(1982; 1986)依据黑云母氧化系数、MF值和 $\text{Mg}^{\#}$ 值划分了花岗岩岩石类型,其中I型花岗岩中黑云母具有较高的氧化

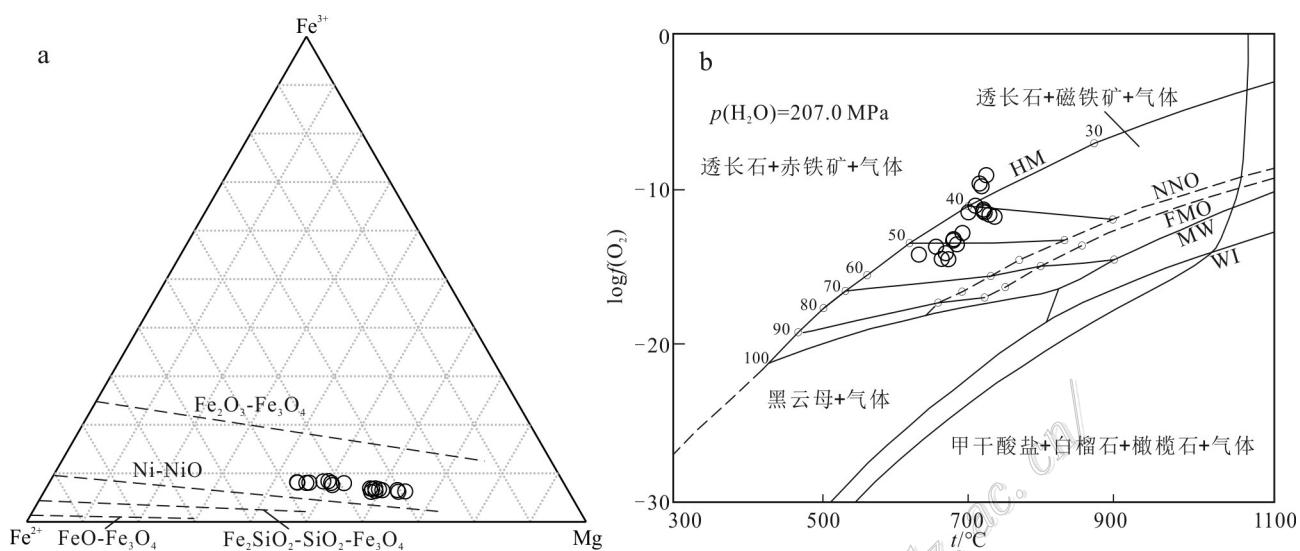


图7 阿日特克山花岗闪长(斑)岩黑云母 $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ -Mg图解(a)和 $\log(f(\text{O}_2))$ - $t$ 图解(b)(据Wones et al., 1965)  
Fig.7 Diagrams of  $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ -Mg (a) and  $\log(f(\text{O}_2))$ - $t$  (b) of the biotites from the Aritekeshan granodiorite (porphyry)  
(after Wones et al., 1965)

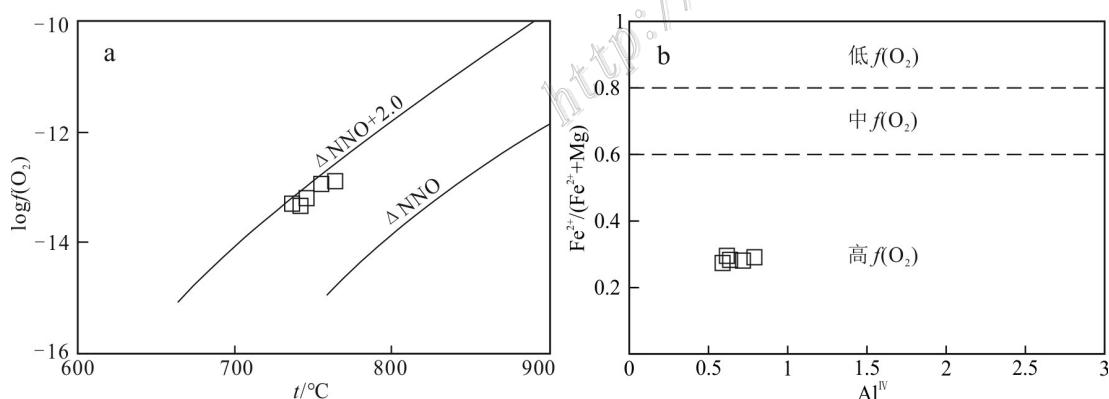


图8 阿日特克山花岗闪长岩角闪石 $\log(f(\text{O}_2))$ - $t$ 图解(a, 据Ridolfi et al., 2010)和 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})-\text{Al}^{\text{IV}}$ 图解(b, 据Dada, 2013)  
Fig.8 Diagrams of  $\log(f(\text{O}_2))$ - $t$  (a, after Ridolfi et al., 2010) and  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})-\text{Al}^{\text{IV}}$  (b, after Dada, 2013) of the hornblendes  
from the Aritekeshan granodiorite (porphyry)

系数(0.121~0.252)和Mg<sup>#</sup>值(0.384~0.626),MF值大于0.38。阿日特克山花岗闪长(斑)岩黑云母均为富镁黑云母,氧化系数为0.15~0.18,Mg<sup>#</sup>值为0.48~0.68,MF值为0.44~0.64,上述比值也表明该成矿岩体为I型花岗岩。

已有研究表明,本区所处宗务隆造山带在东部蓄集、晒勒克郭、察汗诺等地区花岗岩均显示钙碱性I型花岗岩特征,主要成岩物质来源于地壳,混合了少量幔源物质(彭渊等,2016;陈敏,2020)。本次研究的阿日特克山花岗闪长(斑)岩具典型的I型花岗岩特征,同时黑云母及角闪石矿物化学特征亦指示花岗闪长(斑)岩属钙碱性I型花岗岩(图9b)。在黑云母MgO-FeO/(FeO+MgO)图解(图9a)中,黑云母均投入壳幔混合区内,角闪石的TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>图解(图9c)中,样品点同样投入壳幔混合源区,但Ca<sub>B</sub>-(Fe<sup>2+</sup>+Fe<sup>3+</sup>)-Mg图解(图9d)中,样品点

落入幔源区域,可能与后期角闪石的蚀变有关。因此,阿日特克山花岗闪长(斑)岩形成可能与岩浆混合有关,这与前人岩石地球化学及同位素研究结果一致(高会卿等,2020;朱德全等,2020)。

#### 4.3 对成矿的指示

成矿斑岩体岩浆演化过程中温度、压力、含水量以及氧逸度等均制约着岩浆热液的形成、演化及成矿元素的沉淀(沈阳等,2018;季根源等,2021),通过对岩体中黑云母、角闪石的研究,可进一步加深对岩体成矿的认识。

本区花岗闪长(斑)岩中黑云母均属岩浆黑云母,化学特征显示其富镁,少量黑云母中铁含量较高(图4a),Mg/Fe比值为0.79~1.81(平均1.24),w(TiO<sub>2</sub>)较高(2.32%~3.97%),w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)为14.59%~18.27%,w(CaO)均小于0.01%,K/Na比值为32~70,整体上具有富镁高钛高钾、低钠低钙的特征,这与傅金宝

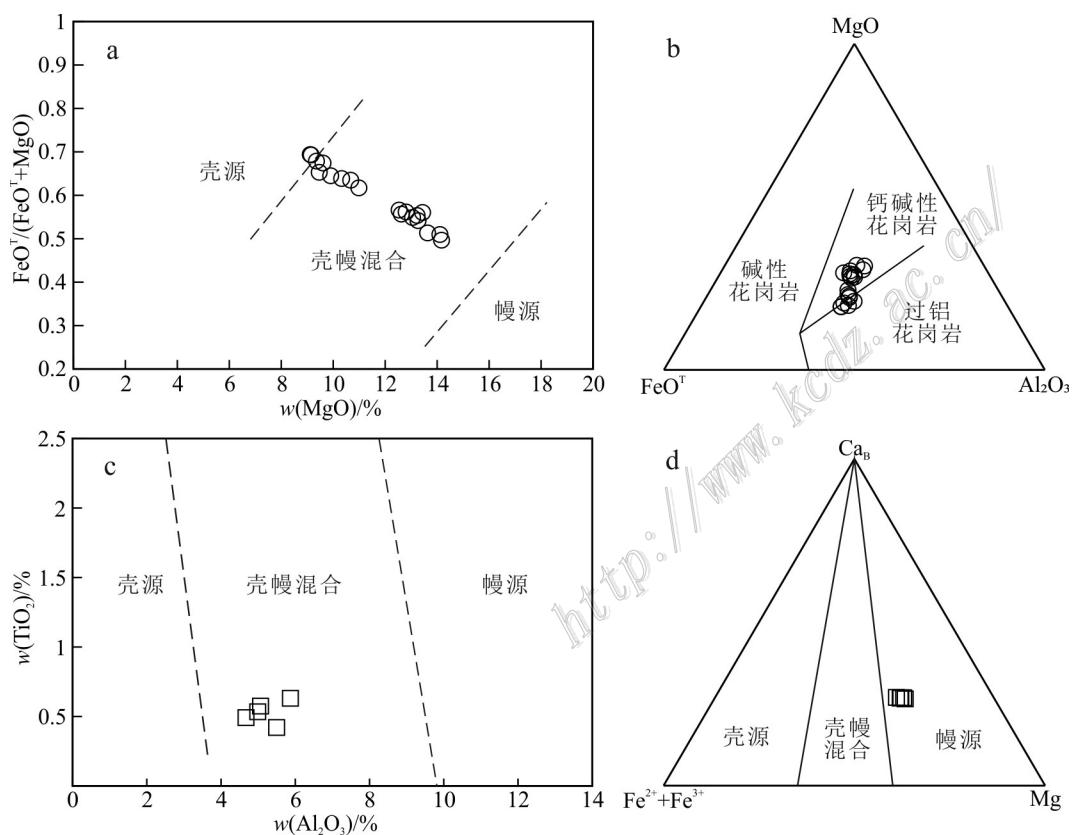


图9 阿日特克山花岗闪长(斑)岩黑云母FeOT/(FeOT+MgO)-MgO图解(a,据Abdel-Rahman, 1994)、FeOT-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>图解(b,据周作侠, 1986)、角闪石TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>图解(c,据姜常义等, 1984)和Ca<sub>B</sub>-(Fe<sup>2+</sup>+Fe<sup>3+</sup>)-Mg图解(d,据谢应雯等, 1990)

Fig. 9 FeOT/(FeOT+MgO)-MgO (a, after Abdel-Rahman, 1994), FeOT-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b, after Zhou, 1986) diagram of the biotites and TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (c, after Jiang et al., 1984) and Ca<sub>B</sub>-(Fe<sup>2+</sup>+Fe<sup>3+</sup>)-Mg (d, after Xie et al., 1990) diagram of the hornblendes from the Aritekeshan granodiorite (porphyry)

(1981)总结的斑岩型铜矿床成矿岩体中岩浆黑云母化学特征基本一致,指示了良好的成矿潜力。

已有研究表明,高氧逸度和富水的岩浆有利于斑岩型铜钼矿床的形成(Richards, 2003)。本次研究利用Ridolfi等(2010)提出的角闪石成分估算岩浆水含量公式,即 $H_2O_{melt}=5.215 Al^* + 12.28$ ,求得阿日特克山斑岩体岩浆水含量为4.91%~5.52%,指示该岩浆富水。

黑云母、角闪石结晶温度为632~736°C、737~764°C,氧逸度位于HM与NNO之间;尽管黑云母稍晚于角闪石结晶形成,但岩浆氧逸度并未发生明显的变化,指示成矿斑岩体形成时均保持了高的氧逸度,在该情况下岩浆中的S会以高价态 $SO_4^{2-}$ 的形式溶入硅酸盐熔体中(向坤等,2019),使得成矿流体中钼、铜不会优先进入硅酸盐矿物中,而是随着岩浆运移,在合适的物理化学条件下沉淀成矿(刘彬等,2010;杜后发等,2017)。高氧逸度情况下Mo多以 $MoO_4^{2-}$ 形式存在,有利于Mo在残留岩浆中的富集。Shen等(2015)的研究揭示岩浆氧逸度与斑岩型矿床的规模存在一定的相关性,本次研究的花岗闪长岩中角闪石氧逸度平均为 $\Delta NNO+1.86$ ,指示该矿床具有形成大型斑岩矿床的潜力。

综合上述分析,阿日特克山成矿斑岩体中黑云母和角闪石地球化学分析数据显示出良好的成矿性;黑云母、角闪石等富水矿物均显示出较高的成矿温度、高的氧逸度及富水性,均指示该地区具有寻找大型斑岩矿床的潜力。

## 5 结 论

(1)由阿日特克山花岗闪长(斑)岩中黑云母和角闪石化学成分计算的矿物结晶温度为632~764°C,岩体侵位压力为81~180 MPa,深度为3.04~6.82 km,为中深成成矿斑岩体。

(2)黑云母和角闪石矿物化学特征指示该区花岗闪长(斑)岩属于钙碱性岩系I型花岗岩,具有壳幔混源的特征。

(3)阿日特克山铜钼矿床为典型的矽卡岩型-斑岩型矿床,其成矿斑岩体中黑云母、角闪石地球化学分析数据显示良好的成矿性;矿物特征参数显示较高的结晶温度、高的氧逸度及富水性,指示该地区具有寻找大型斑岩矿床的潜力。

**致 谢** 审稿专家对论文进行了认真的审阅,并提出建设性修改意见;此外,论文撰写及修改得到了山东科技大学孟元库教授、中国地质大学(武汉)李奇维教授、中国科学院广州地球化学研究所豆敬兆博士的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

## References

- Abdel R. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. Journal of Petrology, 35(2): 525-541.
- Chen M. 2020. Geological environment and controlling elements of the metallogeny in Zongwulong tectonic belt, northern margin of Qaidam Basin[D]. Supervisor: Xue C J. Beijing: China University of Geosciences. 1-119(in Chinese).
- Chen M, Xue C J, Zhao W T, Xue W W and Gu Q. 2020. Geology and S-Pb isotope composition of the Xuji Ag-Pb deposit in Delingha of Qinghai Province and its implications for metallogenesis[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 39(4): 454-468(in Chinese with English abstract).
- Dada O A. 2013. Application of amphibole chemistry in determining the petrogenesis of hornblende-biotite granites from Toro complex, North Central, Nigeria[J]. Continental Journal of Earth Sciences, 8: 1-11.
- Dou J Z, Fu S and Zhang H F. 2015. Consolidation and cooling paths of the Guojialing granodiorites in Jiaodong Peninsula: Implication for crustal uplift and exhumation[J]. Acta Petrologica Sinica, 31 (8): 2325-2336 (in Chinese with English abstract).
- Du H F, Lai T G, Jiang Y Y, Fan P F and Gong W Q. 2017. Mineral chemistry of biotites from the granodiorite porphyry around the Jinjiwo copper deposit in the Jiurui ore district: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 36(3): 329-342(in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[R]. Washington: United States Government Printing Office. 1-49.
- Fu J B. 1981. Chemical composition of biotite in porphyry copper ore[J]. Geology and Exploration, 17(9): 16-19 (in Chinese).
- Fu Y W, Li L J, Yang H Y and Yu C F. 2018. Geological characteristics and prospecting direction of gold-lead-zinc deposit in Jinggengguole area of Zongwulong, Qinghai[J]. Mineral Exploration, 9(4): 559-563(in Chinese with English abstract).
- Gao H Q, Huang L, Zhu D Q, Zhou L G, Gao Z H, Zheng C L and Fan W S. 2020. Survey report of Cu deposit in Aritekeshan area, Delingha City, Qinghai Province[R]. No.8 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources. 13p(in Chinese).
- Hammarstrom J M and Zen E. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer[J]. American Mineralogist, 71(11-12): 1297-1313.
- Henry D J, Guidotti C V and Thomson J A. 2005. The Ti-saturationsur-

- face for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 90: 316-328.
- Ji G Y, Jiang S H, Zhang L S, Li G F, Liu Y F, Yi J J and Zhang S J. 2021. Petrogenic and metallogenic significance of Alubaogeshan granite in Maodeng deposit of southern Da Hinggan Mountains: Evidence from mineralogy of zircon, amphibole and biotite[J]. *Mineral Deposits*, 40(3): 449-474(in Chinese with English abstract).
- Jiang C Y and An S Y. 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, (3): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Kang Z Q, Feng Z H and Wang R. 1994. Reliability comparison of Alinhornblende and biotite barometer: A case study of Guposhan-Huashan granite in North Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(4): 474-479(in Chinese with English abstract).
- Kumar S and Pathak M. 2010. Mineralogy and geochemistry of biotites from Proterozoic granitoids of western Arunachal Himalaya: Evidence of bimodal granitogeny and tectonic affinity[J]. *Journal of Geological Society of India*, 75(5): 715-730.
- Leake B E. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names[J]. *Mineralogical Magazine*, 61(405): 295-310.
- Li H L, Bi X W, Tu G Z, Hu R Z, Peng J T and Wu K X. 2007. Mineral chemistry of biotite from Yanbei pluton: Implication for Sn-metallogeny[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(3): 49-54(in Chinese with English abstract).
- Lin W W and Peng L J. 1994. The estimation of  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  contents in amphibole and biotite from EMPA data[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 155-162(in Chinese with English abstract).
- Liu B, Ma C Q, Liu Y Y and Xiong F H. 2010. Mineral chemistry of biotites from the Tongshankou Cu-Mo deposit: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(2): 151-165(in Chinese with English abstract).
- Mo Y Q, Ma Y L, Tan Y, Luo C H, Yu X L and Zhang J H. 2019. Geological characteristics and genesis of Arikekeshan copper polymetallic deposit in Delingha City, Qinghai Province[J]. *Gold*, 40(5): 18-23(in Chinese with English abstract).
- Nachit H, Ibhi A, Abia E H and Ohoud M B. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neo-formed biotites[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(16): 1142-1415.
- Pan T, Luo C R, Yin Y C and Qian M. 2006. Metallogenic regularity and metallogenic prediction of metal minerals in Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-227(in Chinese).
- Pan T. 2017. Classification of metallogenic units in Qinghai, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 39(1): 16-33(in Chinese with English abstract).
- Peng Y, Ma Y S, Liu C L, Li Z X, Sun J P and Shao P C. 2018. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in North Qaidam[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 206-221(in Chinese with English abstract).
- Qi S S. 2013. Division of tectonic units and characteristics of mineralization in Qinghai Province[J]. *Qinghai Territory and Economy*, 5: 53-62(in Chinese with English abstract).
- Richards J. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Economic Geology*, 98(8): 1515-1533.
- Ridolfi F, Puerini M, Renzulli A, Menna M and Toulkeridis T. 2008. The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andeanzone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176: 94-106.
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45-66.
- Ridolfi F and Renzulli A. 2012. Calcic hornblendes in calc-alkaline and alkaline magmas: Thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130°C and 2.2 GPa[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163: 877-895.
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure an experimental calibration of the Al-in-Hornblende barometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 304-310.
- Shen P, Hattori Keiko, Pan H D, Jackson S and Seitmuratova E. 2015. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the central Asian orogenic belt[J]. *Economic Geology*, 110: 1861-1878.
- Shen Y, Zheng Y C, Ma R, Zhang A P, Xu P Y, Wu C D and Wang Z X. 2018. Mineralogical characteristics of hornblendes and biotites in ore-forming porphyry from Machangqing Cu-Mo deposit in Yunnan Province and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 797-815(in Chinese with English abstract).
- Spear F S. 1981. Amphibole-plagioclase equilibria: An empirical model or the reaction albite+tremolite=edenite+4 quartz[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77: 355-364.
- Tang M Y, Zhu D Q, Ding Z J and Peng Y H. 2021. Characteristics of fluid inclusions and stable isotopes of porphyry copper-molybdenum deposit in Alitech Mountain, northern Margin of Qaidam Basin[A]. In: Proceedings of the first national mineral exploration conference[C]. Chinese Geophysical Society, 2021: 871-874(in Chinese).

- Tang P, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F and Lin B. 2017. Progress in study of mineral chemistry of magmatic and hydrothermal biotites[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 935-950(in Chinese with English abstract).
- Temizel I, Arslan M, Abdioğlu E and Yücel C. 2004. Mineral chemistry and thermobarometry of Eocene monzogabbroic stocks from the Bafra (Samsun) area in Turkey: Implications for disequilibrium crystallization and emplacement conditions[J]. *International Geology Review*, 56(10): 1226-1245.
- Uchida E, Endo S and Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Resource Geology*, 57(1): 47-56.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: Experiment, theory and application[J]. *The American Mineralogist*, 50(9): 1228-1272.
- Xiang K, Xu C D, Xie Z P and Lai R J. 2019. Petrogenesis of the Late Yanshanian Laba granite in northwestern Yunnan Province and its metallogenetic implications: Evidence from mineral chemistry of biotites and amphiboles[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(1): 34-46(in Chinese with English abstract).
- Xie Y W and Zhang Y Q. 1990. Peculiarities and genetic significance of hornblende from granite in the Hengduanshan region[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 10(1): 35-45(in Chinese).
- Xu K Q, Sun N, Wang D Z, Liu C S and Chen K R. 1982. Two genetic series of granitic rocks in southeastern China[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1(2): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Xu K Q and Tu G C. 1986. Relationship between granite geology and mineralization[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press. 1-657(in Chinese).
- Zhang D H. 2015. Geochemistry of ore-forming processes[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-481(in Chinese).
- Zhang D Y, Zhang Z C, Ai Y and Su H M. 2009. Mineralogy of ore-bearing porphyries in Lailisigao'er area of the West Tianshan Mountain and its implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(1): 3-16(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z K, Chen G L, Yang Z K, Tang P, Gao F T, Jiao H J, Wang Z C, Qi J and Wu C N. 2020. Mineral chemistry of biotite and hornblende of ore-bearing porphyry from the Jiama porphyry copper-polymetallic deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(6): 685-702(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z X. 1986. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 59-70(in Chinese with English abstract).
- Zhu D Q, Li G T, Gao Z H, Li S K, Tang M Y and Wu H B. 2020. Geological characteristics and origin analysis of aritekeshan molybdenum deposit in Qinghai Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 36(9): 10-16(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈敏. 2020. 柴北缘宗务隆构造带金属成矿地质环境及控制要素研究[D]. 导师: 薛春纪. 北京: 中国地质大学. 1-119.
- 陈敏, 薛春纪, 赵文涛, 薛万文, 谷强. 2020. 青海德令哈蓄集银铅矿床地质与 S-Pb 同位素组成及其成矿学意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 39(4): 454-468.
- 豆敬兆, 付顺, 张华锋. 2015. 胶东郭家岭岩体固结冷却轨迹与隆升剥蚀[J]. *岩石学报*, 31(8): 2325-2336.
- 杜后发, 赖天功, 江媛媛, 范鹏飞, 龚维强. 2017. 江西金鸡窝铜矿床花岗闪长斑岩黑云母矿物学特征及其对岩石成因与成矿的指示[J]. *岩石矿物学杂志*, 36(3): 329-342.
- 傅金宝. 1981. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. *地质与勘探*, 17(9): 16-19.
- 付彦文, 李良俊, 杨海云, 余福承. 2018. 青海宗务隆京根郭勒地区金铅锌矿地质特征及找矿方向[J]. *矿产勘查*, 9(4): 559-563.
- 高会卿, 黄宁, 朱德全, 周立国, 高振华, 郑成龙, 范伟顺. 2020. 青海省德令哈市阿日特克山地区铜矿普查报告[R]. 山东省第八地质矿产勘查院. 13页.
- 季根源, 江思宏, 张龙升, 李高峰, 刘翼飞, 易锦俊, 张苏江. 2021. 大兴安岭南段毛登矿区阿鲁包格山岩体成岩成矿意义——锆石、角闪石和黑云母矿物学证据[J]. *矿床地质*, 40(3): 449-474.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. *矿物岩石*, (3): 1-8.
- 康志强, 冯佐海, 王睿. 1994. 角闪石黑云母全铅压力计的可靠性对比——以广西姑婆山-花山花岗岩为例[J]. *桂林理工大学学报*, 30(4): 474-479.
- 李鸿莉, 毕献武, 涂光炽, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 2007. 岩背花岗岩黑云母矿物化学研究及其对成矿意义的指示[J]. *矿物岩石*, 27(3): 49-54.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ [J]. *长春地质学院学报*, 24(2): 155-162.
- 刘彬, 马昌前, 刘园园, 熊富浩. 2010. 鄂东南铜山口铜(钼)矿床黑云母矿物化学特征及其对岩石成因与成矿的指示[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(2): 151-165.
- 莫延强, 马元林, 谈艳, 罗长海, 于小亮, 张俊海. 2019. 青海省德令哈市阿日特克山铜多金属矿床地质特征及成因[J]. *黄金*, 40(5): 18-23.
- 潘彤, 罗才让, 尹有昌, 钱明. 2006. 青海省金属矿产成矿规律及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社. 1-227.
- 潘彤. 2017. 青海成矿单元划分[J]. *地球科学与环境学报*, 39(1): 16-33.
- 彭渊, 马寅生, 刘成林, 李宗星, 孙娇鹏, 邵鹏程. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗闪长岩地质特征及其构造意义[J]. *地学前缘*, 23(2): 206-221.
- 祁生胜. 2013. 青海省大地构造单元划分与成矿作用特征[J]. *青海国土资源经略*, 5: 53-62.
- 沈阳, 郑远川, 马睿, 张爱萍, 徐培言, 吴昌炬, 王梓轩. 2018. 云南马

- 厂管铜钼矿成矿岩体的角闪石和黑云母矿物学特征及其意义[J]. 矿床地质, 37(4): 797-815.
- 唐名鹰, 朱德全, 丁正江, 彭永和. 2021. 柴北缘阿日特克山斑岩型铜钼矿床流体包裹体、稳定同位素特征[A]. 首届全国矿产勘查大会论文集[C]. 中国地球物理学会. 2021: 871-874.
- 唐攀, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 林彬. 2017. 岩浆黑云母和热液黑云母矿物化学研究进展[J]. 矿床地质, 36(4): 935-950.
- 向坤, 薛传东, 谢志鹏, 来瑞娟. 2019. 滇西北拉巴燕山晚期花岗岩岩石成因及其成矿指示——黑云母和角闪石矿物化学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 38(1): 34-46.
- 谢应雯, 张玉泉. 1990. 横断山区花岗岩类中角闪石的标型特征及其成因意义[J]. 矿物学报, 10(1): 35-45.
- 徐克勤, 孙鼐, 王德滋, 刘昌实, 陈克荣. 1982. 华南两类不同成因花岗岩岩石学特征[J]. 岩矿测试, 1(2): 1-12.
- 徐克勤, 涂光炽. 1986. 花岗岩地质与成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社. 1-657.
- 张德会. 2015. 成矿作用地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1-481.
- 张东阳, 张招崇, 艾羽, 苏慧敏. 2009. 西天山莱历斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩体矿物学特征及其成岩成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(1): 3-16.
- 张忠坤, 陈国良, 杨征坤, 唐攀, 高福太, 焦海军, 王志超, 郜婧, 吴纯能. 2020. 西藏甲玛铜多金属矿含矿斑岩黑云母和角闪石矿物化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 39(6): 685-702.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1): 59-70.
- 朱德全, 李国涛, 高振华, 李书凯, 唐名鹰, 吴洪彬. 2020. 青海省阿日特克山钼矿床地质特征及矿床成因分析[J]. 山东国土资源, 36(9): 10-16.