

· 专题研究 ·

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

张东阳, 张招崇, 艾羽, 苏慧敏

(中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 莱历斯高尔一带斑岩体位于伊犁板块北部的别珍套-科古琴晚古生代岛弧中段。莱历斯高尔一带斑岩型矿床主要分布有直线距离不足1 km的莱历斯高尔钼矿和3571铜矿, 与成矿作用关系密切的斑岩体的岩性为二长闪长斑岩和花岗闪长斑岩。通过较系统的矿物学研究发现, 本区岩石类型属于造山带钙碱性花岗岩类, 成岩物质主要来源于地壳, 并且有少量地幔物质加入。斑岩体形成于相对高温(740 ~ 790℃)、高 f_{O_2} (10^{-9} ~ 10^{-11} Pa)的环境。3571铜矿斑岩体压力估算范围为140 ~ 230 MPa, 而莱历斯高尔钼矿斑岩体压力估算范围为300 ~ 430 MPa, 显示3571铜矿斑岩体较莱历斯高尔钼矿斑岩体的侵位深度要浅。结合本区的地质背景和岩石地球化学特征等研究成果, 推测3571铜矿斑岩体相当于莱历斯高尔钼矿的浅成相, 其深部可能存在类似于莱历斯高尔的钼矿, 具有钼矿的找矿前景。

关键词: 矿物学; 成岩成矿意义; 莱历斯高尔; 西天山

中图分类号: P578.9; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)01-0003-14

Mineralogy of ore-bearing porphyries in Lailisigao'er area of the West Tianshan Mountain and its implications for petrogenesis and mineralization

ZHANG Dong-yang, ZHANG Zhao-chong, AI Yu and SU Hui-min

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The West Tianshan area is located in the northern part of the Yili plate between the Junggar plate and the Tarim plate, and is an orogenic belt between the Junggar plate and the Yili basin. Porphyry deposits are mainly developed in Lailisigao'er area lying in the central part of the Late Paleozoic Biezhentao-kokirquin arc island. The straight distance between the 3571 Cu deposit and the Lailisigao'er Mo deposit is less than 1 km. The ore-bearing porphyries are predominated by monzodioritic porphyry and granodioritic porphyry. Systematic petrological and mineralogical investigation indicates that the rocks are orogenic calc-alkalic granites formed under the conditions of anhydrous high-temperature (740 ~ 790℃) and high oxygen fugacity (10^{-9} ~ 10^{-11} Pa). Porphyries in the 3571 copper deposit were emplaced shallower than those in the Lailisigao'er ore deposit, as evidenced by the estimation of the pressure (the former being 140 ~ 230 MPa and the latter 300 ~ 430 MPa). In addition, they were derived chiefly from the crust contaminated by mantle materials. Based on geological setting and geochemical characteristics, it is inferred that the dykes outcropped in the 3571 copper deposit may correspond to the upper part of the dykes from the Lailisigao'er ore deposit, and therefore the area beneath the 3571 ore district should be regarded as a potential target for the prospecting of porphyry Mo deposit.

收稿日期: 2008-06-25; 修订日期: 2008-11-12

基金项目: 国家科技支撑计划重点资助项目(2006BAB07B01, 2007BAB25B05)

作者简介: 张东阳(1985-), 男, 学士, 主要从事岩石学和金属矿产的研究, E-mail: zhdy85@126.com; 通讯作者: 张招崇, E-mail: zczhang@cugb.edu.cn。

Key words: mineralogy; petrogenetic and metallogenic significance; Lailisigao'er; West Tianshan

新疆西天山位于全球三大成矿带之一的中亚斑岩铜矿成矿带的腹地,近年来斑岩型铜钼矿找矿勘查获得了重大突破,该区逐渐成为我国重要的斑岩铜钼矿床成矿带,是寻找斑岩型矿床的有利地区,先后发现了喇嘛苏、达巴特、冬吐劲、3571、莱历斯高尔、肯登高尔、群吉等众多中小型斑岩铜钼矿以及塔吾别克等斑岩金矿(图1)。其中莱历斯高尔一带的3571铜矿和莱历斯高尔钼矿是在2000年前后由新疆地矿局第七地质大队发现的。由于受到自然条件和交通条件的制约,迄今为止对莱历斯高尔一带斑岩型矿床的基础地质研究和勘查程度均比较低,前人对该区斑岩型矿床的研究主要基于地球化学、年代学等方面。李华芹等(2006)根据莱历斯高尔矿区的斑岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(362 ± 12 Ma)和全岩 Rb-Sr 等时线年龄(350 ± 15 Ma),认为产于西天山博罗科努地区的莱历斯高尔钼矿斑岩体形成于晚泥盆世—早石炭世,属于海西期岩浆活动产物。张东阳等(2008)则根据3571铜矿和莱历斯高尔钼矿成矿斑岩的锆石 LA-ICP-MS 定年结果(分别为 354.0 ± 0.57 Ma 和 345.8 ± 1.2 Ma),认为两矿区斑岩体为同期次侵入产物;并结合地球化学特征提出莱历斯高尔一带成矿斑岩体的成岩物质主要来源于地壳,并且有少量地幔物质的加入,具有典型钙碱性岩系大陆火山弧花岗岩的演化特征,形成于大陆弧环境,其成因与晚古生代准噶尔洋板块向南俯冲作用有关。但是目前对于与成矿作用密切相关的斑岩体矿物学特征的研究甚少,岩浆的形成和演化过程以及物理化学条件尚不清楚,这在很大程度上制约了对斑岩型矿床成岩成矿过程的深入理解。

对岩石矿物的结构和成分进行系统研究对探讨岩浆演化过程(分异、混染和混合等)具有重要意义,并且斑岩体中主要的造岩矿物——角闪石、黑云母和长石的矿物化学特征与母岩形成时的物理化学条件有着密切的成因关系,这些矿物的成分不仅记录了岩浆起源和演化等成岩信息,而且可作为成矿斑岩体重要的判别标志(吕志成等,2003a,2003b)。只有在阐明斑岩体的岩石矿物学特征的前提下,才能更好地利用地球化学和同位素等方法了解其特征。因此,本文试图通过对莱历斯高尔一带斑岩体的岩

石学、矿物学特征的研究及对比,揭示本区斑岩体形成的物理化学条件及岩石成因,为该区的成岩成矿研究提供新的资料和研究线索。

1 矿区地质概况

西天山位于准噶尔板块与塔里木板块夹持的伊犁板块北半部,即准噶尔板块与伊犁盆地之间的造山带,是欧亚构造域中亚-蒙古-鄂霍茨克弧形造山带的重要组成部分。西天山莱历斯高尔一带斑岩铜钼矿床产于西天山成矿带别珍套-科古琴晚古生代岛弧中段,主要包括莱历斯高尔斑岩钼矿和3571斑岩铜矿,两矿区直线距离不到1 km。矿体受斑岩体和控岩构造控制。区域地层包括奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系等地层,具火山岩建造和碳酸盐岩建造,矿区内出露的地层为晚志留世库茹尔组和博罗霍洛山组的浅变质沉积碎屑岩(图1)。两个矿区总体构造线方向呈北西向,无明显褶皱,地表小型断裂构造较发育,多呈NNE-NEE向,个别呈NW向。区内海西期火山活动和岩浆侵入广泛发育,形成以晚古生代为主的侵入岩,以中酸性岩体最为发育。

2 矿床地质特征

莱历斯高尔钼矿主要产于二长闪长斑岩和花岗闪长斑岩内,局部产于斑岩体与围岩的接触带中。矿区断裂十分发育,以NE、NWW和NEE为主,其中NE向断裂控制着岩浆岩和矿体的分布。矿区共有4个花岗闪长斑岩体,均有铜钼矿化,其中有两个斑岩体矿化较强烈,另两个斑岩体矿化微弱。本区共圈定了9个矿体,矿体中钼品位较高,最低为0.073%,最高0.101%,平均约0.076%^①。矿石中金属矿物为辉钼矿、黄铁矿、斑铜矿、黄铜矿、闪锌矿、白钨矿、赤铁矿、褐铁矿、孔雀石和白铅矿等,脉石矿物主要为石英、角闪石、长石、黑云母、绿泥石和绿帘石等,近矿围岩蚀变为硅化、绿泥石化、绢云母化、绿帘石化和碳酸盐化。矿石为自形或半自形结构,星点或细脉浸染状构造。

① 新疆地质矿产局第七地质大队. 2007. 新疆精河县莱历斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告.

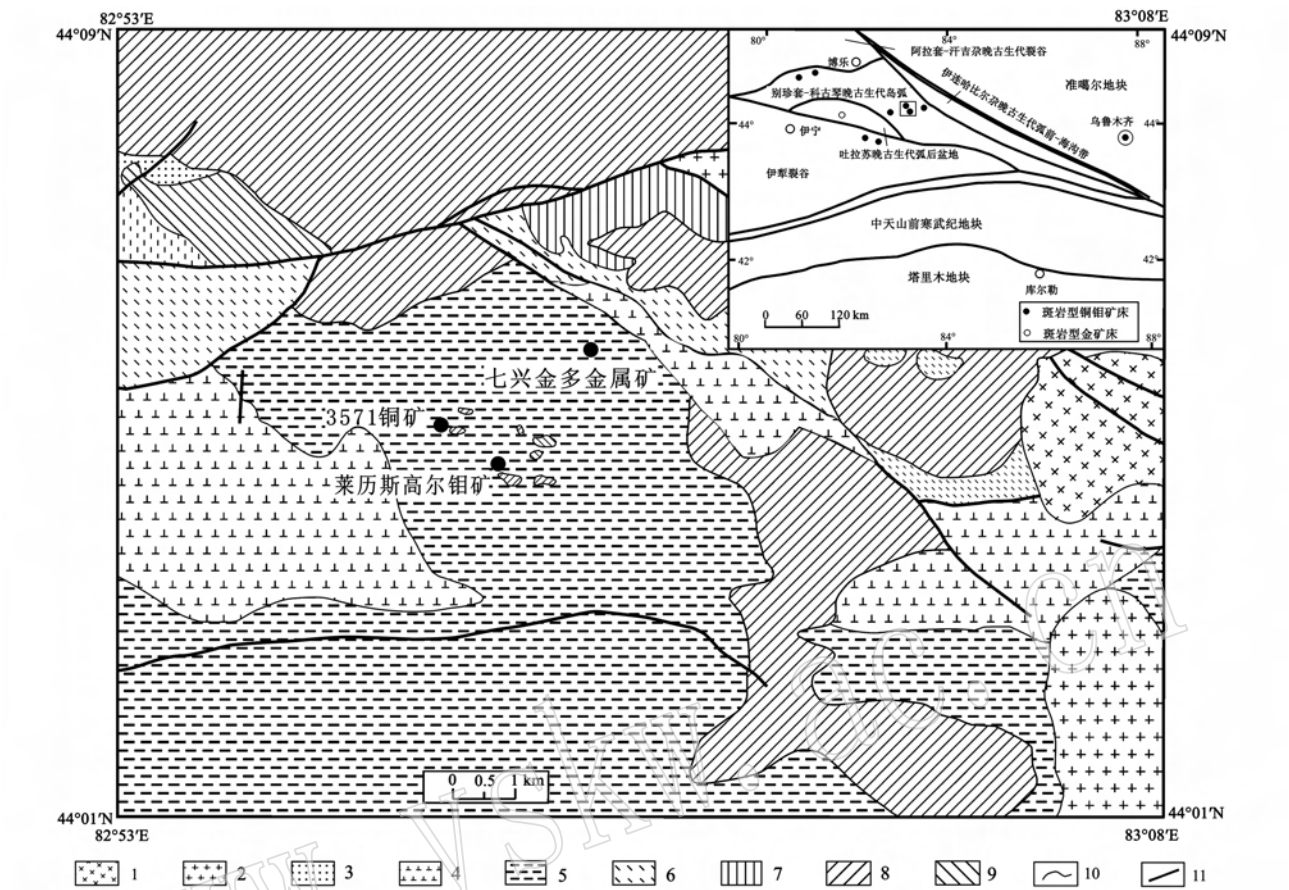


图 1 西天山莱尔斯高尔一带区域地质图[据王志良等(2004)、新疆地质矿产局第七地质大队内部资料^①]
Fig. 1 Regional geological map of Lailisigao'er region, West Tianshan (after Wang Zhiliang *et al.*, 2004; No. 7 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources^①)

1—下二叠统乌郎组;2—下石炭统大哈拉军山组;3—中泥盆统汗吉杂组;4—上志留统博罗霍洛山组;5—上志留统库茹尔组;
6—上奥陶统呼独克达坂组;7—中奥陶统奈楞格勒达坂组;8—二长闪长斑岩;9—花岗闪长斑岩;10—地质界线;11—断裂
1—Lower Permian Wulang Formation; 2—Low Carboniferous Dahalajunshan Formation; 3—Middle Devonian Hanjiga Formation; 4—Upper Silurian Boluohuoluoshan Formation; 5—Upper Silurian Kuruer Formation; 6—Upper Ordovician Hudukedaban Formation; 7—Middle Ordovician Nailenggeledaban Formation; 8—monzodioritic porphyry; 9—granodioritic porphyry; 10—geological boundary; 11—fault

3571 铜矿主要产于二长闪长斑岩中,局部也可可见产于斑岩体与围岩的接触带中。矿区断裂十分发育,以 NE、EW 和 NW 为主。矿区表面出露的斑岩体较少,仅在矿区东侧出露斑岩体。矿区内发育有少量中性脉岩,主要分布于矿区北西部,共见有 3 条,呈 NNE-NE 向不规则脉状产出,长约 12~30 m 不等,宽约 4~7 m。现已圈定工业矿体 21 个,各矿体长 40~376.5 m,厚 1.01~18.39 m,多呈不规则脉状和厚脉状分布于矿区中部、东部,其产状不一,无规律;各矿体铜品位 0.40%~1.27%,平均品位 0.65%^②。矿石矿物主要为黄

铜矿,多呈细脉浸染状分布,局部可见大脉状,次为辉钼矿、斑铜矿,并见有黄铁矿、磁黄铁矿等金属矿物;脉石矿物为石英、角闪石、黑云母、阳起石、方解石等。矿石结构主要有他形粒状结构,次为交代结构、自形-半自形结构。矿石构造主要为浸染状构造,次为细脉状构造、条带状构造。该矿具面型蚀变分带现象,自岩体向西依次可见钾质蚀变带(黑云母、石英-钾长石)、石英-绢云母化带(石英-绢云母-黄铁矿)、青磐岩化带(绿泥石-绿帘石、黄铁矿-方解石),各蚀变带彼此有一定重叠。

① 新疆地质矿产局第七地质大队. 2007. 新疆精河县莱尔斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告.
② 新疆地质矿产局第七地质大队. 2008. 新疆精河县 3571 铜矿普查项目报告.

3 岩体的地质特征

莱历斯高尔一带侵入岩较为发育,莱历斯高尔矿区出露的斑岩体主要为二长闪长斑岩、花岗闪长斑岩,多呈不规则岩株状产出,平面上呈哑铃状、不规则圆形状,在剖面上呈筒状产出,长约80~450 m,宽约30~200 m,延深一般大于200 m,产状陡倾^①。相对于莱历斯高尔矿区,3571铜矿区出露的岩体较少,仅在矿区东邻邻近莱历斯高尔矿区出露有花岗岩类斑岩体,主要岩性为二长闪长斑岩,总体呈近东西向带状分布^②,含矿斑岩出露面积很小,露头不足10 m²。本次研究样品的采集对象主要是与成矿作用密切联系的斑岩体,对本区出露的斑岩体进行系统的采样,选择没有蚀变或蚀变较弱的样品进行矿物化学分析。经过较为详细的手标本和显微镜观察,成矿斑岩体的岩相学特征如下:

二长闪长斑岩,灰色,半自形中细粒结构或似斑状结构,斑状结构不明显,块状构造。主要矿物为石英(15%~20%)、斜长石(15%~25%)、钾长石(15%~25%)、角闪石(20%~25%);石英多为他形粒状,颗粒0.05 mm×0.05 mm~1.2 mm×1.4 mm,平均约为0.4 mm×0.4 mm,可见较明显的溶蚀现象(图2a);斜长石呈柱状、板状,颗粒0.05 mm×0.1 mm~1.0 mm×1.2 mm,平均约为0.4 mm×0.6 mm,可见聚片双晶、环带构造,局部发育绢云母化(图2b、2c);钾长石多为柱状,颗粒0.1 mm×0.2 mm~1.0 mm×1.2 mm,平均约为0.4 mm×0.6 mm;角闪石呈自形-半自形柱状,颗粒0.2 mm×0.3 mm~1.0 mm×1.5 mm,平均约为0.4 mm×0.5 mm,绿-淡黄色,多色性较强,可见角闪石简单双晶(图2d)。次要矿物为黑云母(5%~10%),片状,浅黄或褐红色,多色性极强,粒度0.15 mm×0.2 mm~1.2 mm×1.5 mm,平均约为0.5 mm×0.6 mm,局部绿泥石化,甚至发生完全的绿泥石化(图2e)。副矿物有榍石(3%~5%)、锆石(2%~3%)、磁铁矿(1%~2%)。

花岗闪长斑岩,灰白色,花岗结构(不定向排列),块状构造,主要矿物为石英(20%~25%)、斜长石(30%~35%)、钾长石(15%~20%);石英多为

他形粒状,颗粒0.1 mm×0.1 mm~1.2 mm×1.4 mm,平均约为0.4 mm×0.5 mm;斜长石呈柱状、板状,颗粒0.1 mm×0.2 mm~1.0 mm×1.4 mm,平均约为0.4 mm×0.6 mm,部分绢云母化;钾长石多为柱状,颗粒0.2 mm×0.3 mm~1.0 mm×1.2 mm,平均约为0.3 mm×0.6 mm;次要矿物为黑云母(5%~10%)、角闪石(5%~10%)。黑云母,片状,浅黄或褐红色,多色性极强,粒度小至0.1 mm×0.15 mm,大者为1.0 mm×1.2 mm,平均约为0.4 mm×0.5 mm,部分颗粒沿解理缝发生绿泥石化(图2f);角闪石自形-半自形柱状,颗粒0.2 mm×0.3 mm~1.0 mm×1.5 mm,平均约为0.4 mm×0.5 mm,绿-淡黄色,多色性较强,部分发生绿泥石化,可见角闪石简单双晶(图2f)。副矿物有榍石(3%~4%)、锆石(3%~5%)、磷灰石(2%~3%)、磁铁矿(1%~3%)。

4 造岩矿物特征及化学成分

4.1 斜长石

斜长石为莱历斯高尔一带斑岩体的主要浅色造岩矿物之一,多数为自形-半自形板状、柱状。斜长石电子探针分析结果见表1。3571铜矿斑岩体中的斜长石的端员组分Ab含量为98.82%~99.96%,Or组分为0.00~0.87%,An组分在0.04%~0.60%之间;而莱历斯高尔钼矿斑岩体的斜长石中组分Ab的含量明显偏低,变化范围为43.52%~99.65%,平均值为79.55%,而Or、An组分又偏高,分别在0.00~5.77%和0.00~50.71%之间,平均值为1.78%和18.67%。由于3571铜矿床斑岩体样品较少,斜长石Ab含量过高的原因有待进一步研究。

4.2 钾长石

钾长石是莱历斯高尔一带斑岩体的另一种主要浅色造岩矿物,多呈柱状,与斜长石、角闪石、黑云母共生,部分呈板状。钾长石成分及端员组分见表2,可看出所有钾长石基本不含CaO(0.00~0.04%),其Ab含量变化范围在1.58%~9.64%之间,但没有形成条纹长石,表明形成温度相对较高。

4.3 角闪石

角闪石是莱历斯高尔一带斑岩体中主要的铁镁

① 新疆地质矿产局第七地质大队. 2007. 新疆精河县莱历斯高尔一带铜钼矿及外围金多金属矿普查报告.

② 新疆地质矿产局第七地质大队. 2008. 新疆精河县3571铜矿普查项目报告.

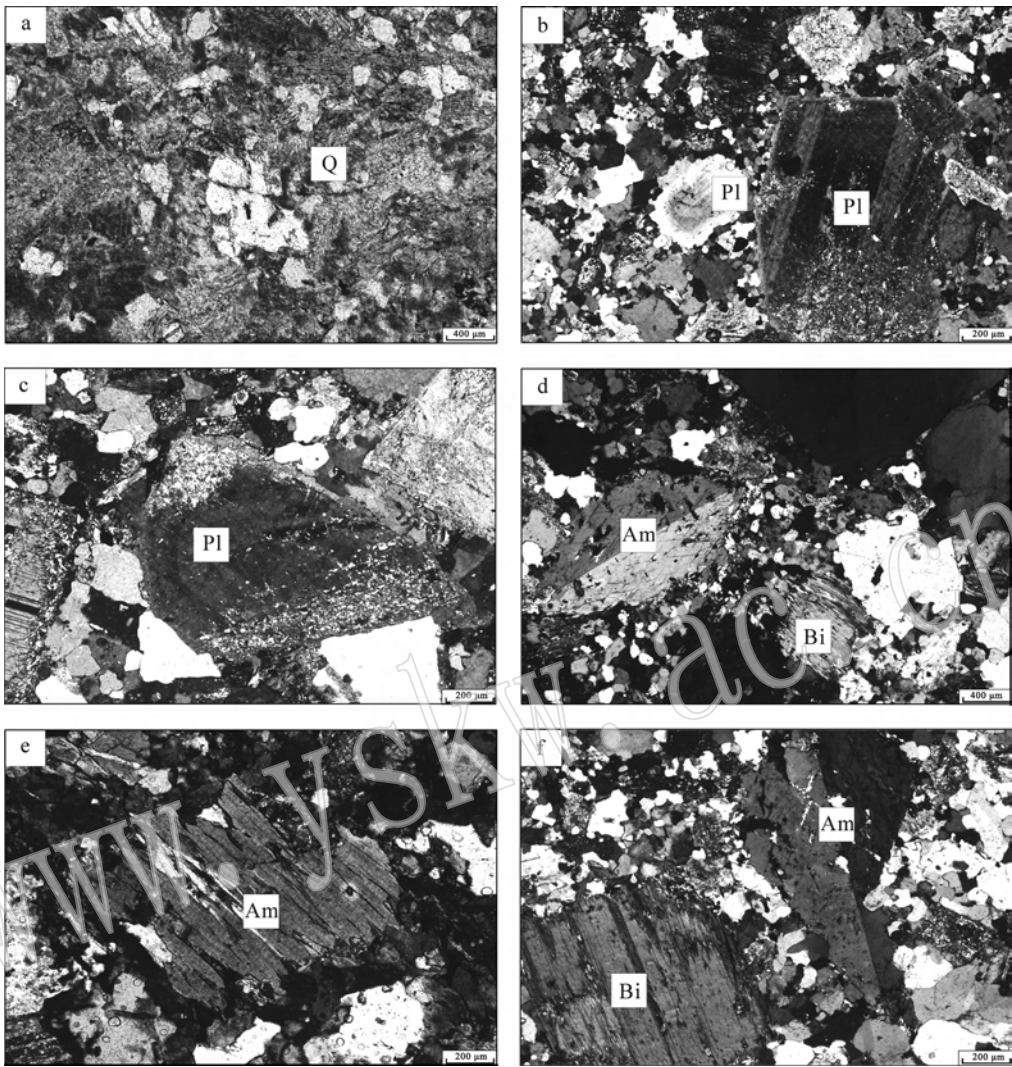


图 2 含矿斑岩体样品显微照片

Fig. 2 Microphotograph of ore-bearing porphyry

a—3571 铜矿区二长闪长斑岩中石英(Q)出现熔蚀现象,单偏光;b—莱历斯高尔钼矿床二长闪长斑岩中斜长石(Pl)具有聚片双晶、环带构造,并局部发生绢云母化,正交偏光;c—莱历斯高尔钼矿床二长闪长斑岩中斜长石具有环带构造,并发生局部绢云母化,正交偏光;d—莱历斯高尔钼矿床二长闪长斑岩中角闪石(Am)可见简单双晶,黑云母局部发生绿泥石化,正交偏光;e—3571 铜矿二长闪长斑岩中黑云母矿物颗粒(Bi)发生严重的绿泥石化,正交偏光;f—莱历斯高尔钼矿床花岗闪长斑岩中角闪石可见简单双晶,角闪石边部发生绿泥石化,黑云母沿解理缝和边部也发生绿泥石化,正交偏光

a—corrosion of quartz(Q) in monzodioritic porphyry in the 3571 copper deposit, plane polarized light; b—polysynthetic twin and zonal structure of plagioclase(Pl), and its partial sericitized alteration in monzodioritic porphyry in the Lailisigao'er molybdenum deposit, crossed polarized light; c—zonal structure of plagioclase(Pl) and its partial sericitized alteration in monzodioritic porphyry of the Lailisigao'er molybdenum deposit, crossed polarized light; d—simple twin of amphibole and chloritization of biotite in localized monzodioritic porphyry of the Lailisigao'er molybdenum deposit, crossed polarized light; e—heavy chloritization of biotite in monzodioritic porphyry of the 3571 copper deposit, crossed polarized light; f—simple twin and partial chloritization of amphibole and chloritization of biotite in granodioritic porphyry of the Lailisigao'er molybdenum deposit, crossed polarized light

矿物,在斑岩体中分布较均匀,常有磁铁矿、磷灰石、榍石等包裹体。经电子探针成分分析(表 3),3571 铜矿斑岩体角闪石 SiO₂ 的含量在 46.53% ~ 54.02% 之间,平均为 50.38%,MgO 的含量在 9.55% ~ 15.59% 之间,平均为 12.49%;莱历斯高尔钼矿角闪石 SiO₂ 含量在 46.21% ~ 51.97% 之间,平均为 49.64%,MgO 的含量在 10.66% ~ 13.83% 之间,平均为 12.68%,可见两个矿区斑岩体的角闪石 SiO₂、

表 1 斜长石电子探针成分分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of plagioclase

矿区	3571 铜矿										莱尔斯高尔铅矿									
	D7-1-3	D7-1-2	D7-1-1-2	D7-1-1-1	D3-1-1	D8-1-1	D10-1-1	D12-1-2	D14-1-3-2	D14-1-3-1	D14-1-2-2	D14-1-2-1	D14-1-1-2	D14-1-1-1	D8-1-2	D9-1-1	D12-1-5	D12-1-4	D12-1-1	LLK-3-2
样品号	D7-1-3	D7-1-2	D7-1-1-2	D7-1-1-1	D3-1-1	D8-1-1	D10-1-1	D12-1-2	D14-1-3-2	D14-1-3-1	D14-1-2-2	D14-1-2-1	D14-1-1-2	D14-1-1-1	D8-1-2	D9-1-1	D12-1-5	D12-1-4	D12-1-1	LLK-3-2
SiO ₂	68.28	67.94	68.12	68.48	67.51	59.28	61.24	59.99	65.28	67.00	66.69	66.11	64.73	64.94	57.63	67.74	58.37	59.56	68.36	52.86
TiO ₂	0.04	0.07	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.26	0.22	0.00	0.11
Al ₂ O ₃	19.17	18.93	19.38	19.03	19.01	25.42	23.92	24.60	22.03	19.96	20.07	20.29	21.68	20.95	26.31	18.98	25.80	25.11	20.09	23.21
FeO	0.00	0.00	0.02	0.10	0.02	0.06	0.06	0.24	0.00	0.00	0.11	0.53	0.00	0.18	0.36	0.00	0.08	0.23	0.00	0.12
MnO	0.06	0.00	0.00	0.21	0.05	0.03	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.01	0.11	0.07	0.06	0.14	6.95	5.87	6.22	0.95	1.23	1.14	1.43	3.41	2.09	6.98	0.00	8.14	6.94	0.00	14.55
Na ₂ O	12.43	12.40	12.63	12.68	12.69	8.18	9.19	8.52	10.84	11.66	12.41	11.74	10.46	11.36	7.91	12.29	7.85	8.32	11.23	6.90
K ₂ O	0.00	0.00	0.17	0.00	0.11	0.48	0.36	0.43	0.93	0.15	0.16	0.17	0.00	0.16	0.53	0.13	0.15	0.21	0.06	1.39
Total	99.99	99.45	100.39	100.73	99.53	100.40	100.64	100.27	100.04	100.00	100.58	100.27	100.28	99.89	99.95	99.18	100.65	100.59	99.74	99.14
Si	2.9911	2.9931	2.9788	2.9859	2.9804	2.6456	2.7181	2.6785	2.8751	2.9450	2.9265	2.9131	2.8518	2.8744	2.5937	2.9930	2.6053	2.6520	2.9858	2.4849
Ti	0.0013	0.0023	0.0000	0.0056	0.0000	0.0000	0.0000	0.0040	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0087	0.0074	0.0000	0.0039
Al	0.9897	0.9829	0.9988	0.9779	0.9891	1.3371	1.2513	1.2945	1.1435	1.0340	1.0380	1.0537	1.1257	1.0929	1.3956	0.9883	1.3572	1.3177	1.0342	1.2859
Fe ²⁺	0.0000	0.0000	0.0007	0.0036	0.0007	0.0022	0.0022	0.0090	0.0000	0.0000	0.0040	0.0195	0.0000	0.0067	0.0135	0.0000	0.0030	0.0086	0.0000	0.0047
Mn	0.0022	0.0000	0.0000	0.0078	0.0019	0.0011	0.0000	0.0057	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0088	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ca	0.0005	0.0052	0.0033	0.0028	0.0066	0.3323	0.2791	0.2976	0.0448	0.0579	0.0536	0.0675	0.1610	0.0991	0.3366	0.0000	0.3893	0.3311	0.0000	0.7328
Na	1.0557	1.0592	1.0708	1.0720	1.0862	0.7078	0.7908	0.7376	0.9257	0.9937	1.0559	1.0030	0.8935	0.9749	0.6902	1.0528	0.6793	0.7183	0.9510	0.6289
K	0.0000	0.0000	0.0095	0.0000	0.0062	0.0273	0.0204	0.0245	0.0522	0.0084	0.0090	0.0096	0.0000	0.0090	0.0304	0.0073	0.0085	0.0119	0.0033	0.0833
Total	5.0406	5.0427	5.0619	5.0556	5.0712	5.0535	5.0619	5.0513	5.0417	5.0391	5.0869	5.0664	5.0321	5.0641	5.0688	5.0429	5.0513	5.0469	4.9743	5.2244
Ab	99.96	99.51	98.82	99.74	98.83	66.31	72.53	69.61	90.51	93.74	94.41	92.86	84.74	90.01	65.29	99.31	63.07	67.68	99.65	43.52
An	0.04	0.49	0.30	0.26	0.60	31.13	25.60	28.08	4.38	5.46	4.79	6.25	15.26	9.15	31.84	0.00	36.14	31.20	0.00	50.71
Or	0.00	0.00	0.87	0.00	0.56	2.56	1.87	2.31	5.11	0.79	0.80	0.88	0.00	0.83	2.88	0.69	0.79	1.12	0.35	5.77

分析单位:中国地质大学(北京)地质实验中心电子探针实验室;仪器型号:EPMA1600;实验条件:加速电压 15 kV,电流 1×10^{-8} A,束斑 1 μm ,ZAF 修正法;下同。

表 2 钾长石电子探针成分分析结果
Table 2 Electron microprobe analyses of feldspar

矿区 样品号	3571 铜矿 ^a	莱历斯高尔钼矿 ^b					
	D3-1-1	LLK-3-2	D8-1-2	D9-1-1	D12-1-5	D12-1-4	D12-1-1
SiO ₂	64.85	64.31	63.77	64.43	64.45	64.70	64.94
TiO ₂	0.30	0.00	0.00	0.58	0.44	0.00	0.07
Al ₂ O ₃	17.84	17.86	17.74	18.36	18.28	17.50	18.03
FeO	0.06	0.38	0.03	0.00	0.00	0.00	0.08
MnO	0.00	0.15	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Na ₂ O	0.59	1.10	0.48	0.18	0.39	0.44	0.70
K ₂ O	16.98	15.66	16.99	17.05	16.96	16.68	16.71
Total	100.62	99.48	99.17	100.60	100.56	99.32	100.53
Si	2.996 4	2.996 2	2.994 6	2.975 4	2.978 4	3.019 9	2.998 5
Ti	0.010 4	0.000 0	0.000 0	0.020 1	0.015 3	0.000 0	0.002 4
Al	0.971 5	0.980 7	0.981 8	0.999 3	0.995 6	0.962 7	0.981 2
Fe ²⁺	0.002 3	0.014 8	0.001 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.003 1
Mn	0.000 0	0.005 9	0.006 4	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
Ca	0.000 0	0.001 0	0.000 0	0.000 0	0.002 0	0.000 0	0.000 0
Na	0.052 9	0.099 4	0.043 7	0.016 1	0.034 9	0.039 8	0.062 7
K	1.000 5	0.930 3	1.017 4	1.004 0	0.999 4	0.992 7	0.983 9
Total	5.034 0	5.028 3	5.045 0	5.014 9	5.025 7	5.015 1	5.031 7
Ab	5.02	9.64	4.12	1.58	3.37	3.86	5.99
An	0.00	0.10	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00
Or	94.98	90.26	95.88	98.42	96.44	96.14	94.01

MgO 的成分含量十分接近。角闪石电子探针分析结果显示本区斑岩体中的角闪石均为钙角闪石,以氧离子数 23 为基准,求得全部样品的阳离子系数见表 3。根据 Leake 等(1997)的分类方案进行分类,所测定的角闪石样品均落在阳起石、镁角闪石范围(图 3)。

4.4 黑云母

黑云母在莱历斯高尔钼矿斑岩体中常见,而在 3571 铜矿斑岩体中极少见,可能是因为绿泥石化蚀变严重所致(图 2e)。结合黑云母的电子探针分析结果并以氧为 11 计算阳离子数(表 4),在黑云母分类图解(图 4)中,莱历斯高尔钼矿床区斑岩体中黑云母属于镁质黑云母-铁质黑云母。

5 讨论

5.1 岩石成因

岩浆中的主要造岩矿物长石、角闪石、黑云母的

成分特征可用来划分岩石的系列和类型,并反映岩

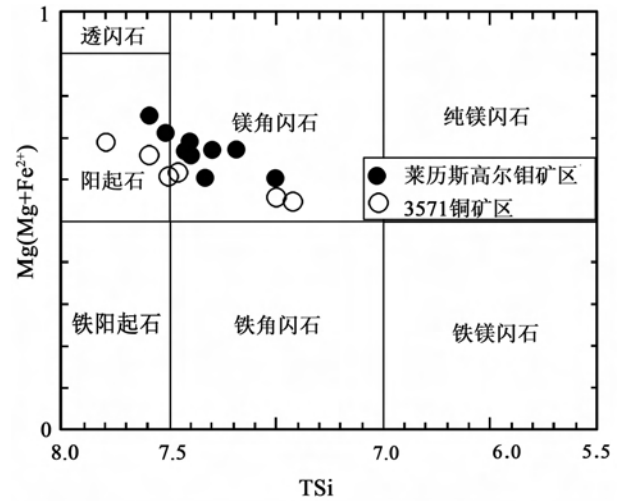


图 3 角闪石成分分类图(底图据 Leake 等, 1997)
Fig. 3 Classification diagram of amphiboles
(after Leake et al., 1997)

表 3 角闪石电子探针成分分析结果

Table 3 Electron microprobe analyses of amphibole

矿区	3571 铜矿										莱尔斯高尔钼矿							
	样品号	D3-1	D3-2	D3-3 *	D3-4 *	D7-1-3	D7-1-2	D7-2-1	D7-2-2	D8-1-1 *	D10-1-1 *	D12-1-2	D14-1	D14-2	D14-3	D14-4	D14-5	D14-6
Si ₂ O	51.15	48.59	46.53	46.65	50.93	54.02	52.22	52.95	47.30	46.21	49.24	50.66	50.03	49.89	50.98	51.97	50.51	
TiO ₂	0.22	0.41	0.48	0.75	0.49	0.18	0.88	0.32	1.22	1.55	1.37	0.81	1.08	1.45	1.39	0.44	1.09	
Al ₂ O ₃	4.25	4.93	7.16	6.19	4.92	3.19	4.21	3.52	7.93	9.11	5.23	3.77	5.22	5.37	4.20	4.33	4.37	
FeO	16.66	17.37	21.30	20.03	14.56	12.02	12.94	11.73	14.70	15.42	15.41	14.86	14.68	14.78	14.17	13.38	13.64	
MnO	0.73	0.22	0.06	0.21	0.67	0.39	0.60	0.36	1.05	0.53	1.00	0.72	0.94	0.66	1.06	0.85	0.34	
MgO	11.97	11.63	9.55	10.24	12.71	14.66	13.58	15.59	11.47	10.66	12.68	13.56	12.78	12.24	13.13	13.83	13.79	
CaO	11.83	11.84	10.75	11.40	11.87	11.74	11.58	11.67	10.95	10.82	10.72	11.06	10.93	11.56	11.03	10.97	11.84	
Na ₂ O	0.47	1.74	1.38	1.18	1.01	0.74	0.81	0.82	2.02	2.25	1.46	1.37	1.15	1.32	1.12	1.06	1.14	
K ₂ O	0.33	0.68	0.65	0.50	0.44	0.22	0.52	0.33	0.84	1.05	0.84	0.30	0.66	0.29	0.52	0.37	0.38	
Total	97.61	97.41	97.86	97.15	97.60	97.16	97.34	97.29	97.48	97.60	97.95	97.11	97.47	97.56	97.60	97.20	97.10	
Si	7.495 0	7.281 0	6.919 0	6.995 0	7.457 0	7.790 0	7.592 0	7.590 0	7.000 0	6.878 0	7.187 0	7.403 0	7.298 0	7.331 0	7.422 0	7.513 0	7.400 0	
Ti	0.024 0	0.046 0	0.054 0	0.085 0	0.054 0	0.020 0	0.096 0	0.035 0	0.136 0	0.174 0	0.150 0	0.089 0	0.119 0	0.160 0	0.152 0	0.048 0	0.120 0	
Al	0.734 0	0.870 0	1.254 0	1.093 0	0.849 0	0.542 0	0.721 0	0.594 0	1.382 0	1.597 0	0.899 0	0.649 0	0.897 0	0.929 0	0.720 0	0.737 0	0.754 0	
Fe ³⁺	0.318 0	0.038 0	0.854 0	0.646 0	0.036 0	0.000 0	0.000 0	0.284 0	0.135 0	0.000 0	0.504 0	0.460 0	0.405 0	0.018 0	0.278 0	0.378 0	0.093 0	
Fe ²⁺	1.724 0	2.139 0	1.795 0	1.866 0	1.747 0	1.450 0	1.573 0	1.122 0	1.685 0	1.919 0	1.377 0	1.356 0	1.386 0	1.798 0	1.448 0	1.240 0	1.578 0	
Mn	0.091 0	0.028 0	0.008 0	0.027 0	0.083 0	0.048 0	0.074 0	0.044 0	0.132 0	0.067 0	0.124 0	0.089 0	0.116 0	0.082 0	0.131 0	0.104 0	0.042 0	
Mg	2.615 0	2.598 0	2.117 0	2.289 0	2.774 0	3.152 0	2.943 0	3.331 0	2.531 0	2.365 0	2.759 0	2.954 0	2.779 0	2.681 0	2.850 0	2.980 0	3.012 0	
Ca	1.857 0	1.901 0	1.713 0	1.831 0	1.862 0	1.814 0	1.804 0	1.792 0	1.736 0	1.726 0	1.676 0	1.732 0	1.708 0	1.820 0	1.721 0	1.699 0	1.859 0	
Na	0.134 0	0.505 0	0.398 0	0.344 0	0.287 0	0.207 0	0.228 0	0.228 0	0.580 0	0.649 0	0.414 0	0.388 0	0.326 0	0.376 0	0.316 0	0.297 0	0.323 0	
K	0.062 0	0.130 0	0.123 0	0.096 0	0.082 0	0.040 0	0.096 0	0.060 0	0.159 0	0.199 0	0.156 0	0.056 0	0.123 0	0.054 0	0.097 0	0.068 0	0.071 0	
Total	15.054 0	15.536 0	15.235 0	15.272 0	15.231 0	15.063 0	15.127 0	15.080 0	15.476 0	15.574 0	15.246 0	15.176 0	15.157 0	15.249 0	15.135 0	15.064 0	15.252 0	
M	0.60	0.55	0.54	0.55	0.61	0.68	0.65	0.75	0.60	0.55	0.67	0.69	0.67	0.60	0.66	0.71	0.66	

* 为用于角闪石全铝压力计算的样品。

表 4 莱历斯高尔钼矿黑云母电子探针成分分析结果

Table 4 Electron microprobe analyses of biotite in Lailisigao' er molybdeum deposit

样品号	D8-1	D8-2	D10-1	D10-2	D10-3	D8-02	D8-03	D10-2	D10-3	D10-4	D10-5
SiO ₂	36.74	37.16	37.01	38.04	37.20	36.06	35.69	35.68	37.48	35.73	35.29
TiO ₂	4.67	4.53	4.16	4.33	4.08	4.19	3.90	4.19	3.61	3.81	4.35
Al ₂ O ₃	13.75	14.22	13.98	13.86	13.80	13.16	13.85	13.60	13.73	14.07	13.76
FeO	19.61	18.93	19.82	18.49	18.30	23.22	22.30	22.82	21.59	22.39	21.24
MnO	0.64	0.07	0.38	0.00	0.32	0.50	0.30	0.51	0.19	0.00	0.51
MgO	9.87	10.39	10.13	10.62	11.01	8.77	9.71	9.49	9.80	10.43	10.57
Na ₂ O	0.27	0.39	0.19	0.36	0.43	0.12	0.26	0.15	0.11	0.00	0.02
K ₂ O	9.56	9.81	10.06	9.99	9.93	9.22	9.52	9.05	8.82	8.82	9.88
Total	95.11	95.50	95.73	95.69	95.07	95.24	95.53	95.49	95.33	95.25	95.62
Si	2.829 5	2.832 9	2.835 1	2.883 5	2.848 1	2.821 1	2.775 7	2.777 8	2.878 6	2.768 5	2.739 0
Al ^{IV}	1.170 5	1.167 1	1.164 9	1.116 5	1.151 9	1.178 9	1.224 3	1.222 2	1.121 4	1.231 5	1.258 7
Al ^{VI}	0.077 6	0.110 6	0.097 3	0.121 8	0.093 3	0.034 5	0.045 2	0.025 7	0.121 4	0.053 3	0.000 0
Ti	0.270 6	0.259 8	0.239 7	0.246 9	0.235 0	0.246 6	0.228 2	0.245 4	0.208 6	0.222 1	0.254 0
Fe ³⁺	0.234 3	0.225 7	0.200 3	0.240 1	0.188 9	0.205 2	0.146 8	0.186 5	0.268 3	0.197 1	0.131 7
Fe ²⁺	1.028 7	0.981 2	1.069 5	0.932 1	0.982 9	1.314 0	1.303 7	1.299 4	1.118 5	1.253 8	1.247 0
Mn	0.041 7	0.004 5	0.024 7	0.000 0	0.020 8	0.033 1	0.019 8	0.033 6	0.012 4	0.000 0	0.033 5
Mg	1.133 2	1.180 8	1.156 8	1.200 1	1.256 6	1.022 8	1.125 8	1.101 4	1.122 1	1.204 8	1.223 0
Ca	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
Na	0.040 3	0.057 6	0.028 2	0.052 9	0.063 8	0.018 2	0.039 2	0.022 6	0.016 4	0.000 0	0.003 0
K	0.939 3	0.954 1	0.983 1	0.966 1	0.969 9	0.920 2	0.944 6	0.898 9	0.864 2	0.871 8	0.978 3
Total	7.765 7	7.774 3	7.799 7	7.759 9	7.811 1	7.794 8	7.853 2	7.813 5	7.731 7	7.802 9	7.868 3
稳定度	52.71	50.55	52.33	49.41	48.25	59.76	56.30	57.43	55.28	54.63	52.99

注:黑云母稳定度 = $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}) \times 100$ 。

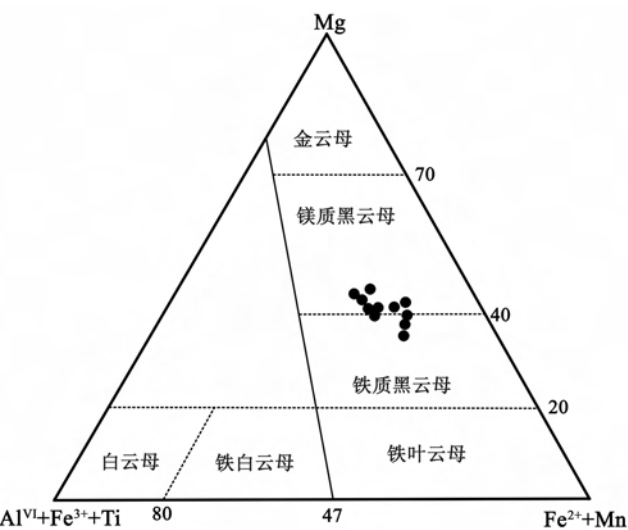


图 4 黑云母成分分类图(底图据 Foster, 1960)

Fig. 4 Classification diagram of biotite (after Foster, 1960)

浆的起源、演化及岩石成因。本区角闪石具有低 Ti (离子数 <0.5)、高 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ ($0.44 \sim 0.70$) 特征,指示其为 I 型花岗岩成因,而非 S 型或 A 型 (Chappel and White, 1974; White and Chappel, 1983; Clemens and Wall, 1984)。角闪石中的镁指数 $M[\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 值是区分壳型、壳幔型和幔型花岗岩的重要标志 (Leake, 1978),幔型花岗岩中角闪石的 M 值 >0.7 ,壳型花岗岩中角闪石的 M 值 <0.5 ,壳幔型花岗岩中的角闪石的 M 值位于 $0.5 \sim 0.7$ 之间。本区成矿斑岩中的 M 值变化范围为 $0.54 \sim 0.75$,平均值为 0.63 ,反映了其壳幔型花岗岩的成分特点。另外根据角闪石 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解 (图 5) 可知,本区角闪石主要落在壳幔混源区,部分测点落在壳源区,并且 3571 铜矿斑岩体中的角闪石比莱历斯高尔钼矿斑岩体的角闪石更加接近壳源区,从整体上反映出本区成岩物质主要来源于地壳,并且有

少量地幔物质的加入。

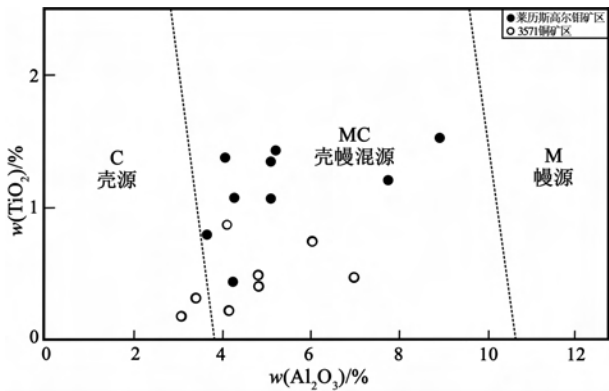


图5 角闪石 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图底据陈光远等,1993)
Fig. 5 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of amphibole(after Chen Guangyuan *et al.* , 1993)

据丁孝石(1988)的研究,典型幔源黑云母中 $\text{MgO} > 15\%$, 壳源黑云母中 $\text{MgO} < 6\%$, 本区所测样品中 MgO 的含量变化在 $8.77\% \sim 11.01\%$, 平均 10.07% , 具壳幔过渡性质。在黑云母的 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO}) - \text{MgO}$ 图解(图6)中,莱尔斯高尔铝矿床区斑岩体的黑云母主要投影于壳幔源区,部分样品落在壳源区,反映本区成岩物质主要来源于地壳,并且有少量地幔物质加入,这也与角闪石的镁指数 M 值分析及角闪石 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解分析结果基本一致。

结合黑云母的电子探针分析结果(表4),所测样品的 Al^{VI} 含量($0.0000 \sim 0.1218$)低于 S 型花岗岩($0.353 \sim 0.561$),属于 I 型花岗岩的黑云母($0.144 \sim 0.224$)(Whalen and chappell,1988)。在六次配位 Mg 、 Fe 离子关系方面,表现出 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 与 Mg 离子

数呈负相关性,且绝大多数在 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} < 1.3$ 、 $\text{Mg} > 1.0$ 的范围内,同样显示具有 I 型花岗岩(同熔型花岗岩)特征(王洁民等,1988)。徐克勤等(1984)曾提出用黑云母的 $\text{MF}[\text{MF} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn})]$ 来区分同熔型和改造型花岗岩, $\text{MF} < 0.38$ 为改造型花岗岩,反之为同熔型花岗岩。本区所测样品 MF 值为 $0.40 \sim 0.56$, 表明莱尔斯高尔一带斑岩体属同熔型(I 型)花岗岩类,由幔源岩浆同熔壳源物质形成,这与其同位素地球化学特征得出的结论一致(张东阳等,2008)。

Abdel-Rahman(1994)曾统计了世界很多不同类型花岗岩中黑云母的组成,发现可以用黑云母的 $\text{FeO}^T - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 组成来有效区分花岗岩的类型。他认为非造山碱性花岗岩系产于高温、无水的环境,不利于早期磁铁矿及钛铁氧化物晶出,故晚期晶出的黑云母具有富 Fe 特征;与之相反,造山带的钙碱性岩系则与俯冲有关,俯冲过程中产生富水流体特别有利于磁铁矿的早期晶出,致使晚期晶出的黑云母具有富 Mg 、相对富 Al 和贫 Ti 的特征。将本区黑云母投影到 $\text{FeO}^T - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图7)上,发现均落在造山带钙碱性花岗岩(C)中,暗示本区斑岩成因与俯冲有关,并且黑云母具有富 Mg 、相对富 Al 和贫 Ti 的特征,这也与本区的地球化学、年代学所分析得出的地球动力学构造环境结果一致(张东阳等,2008)。

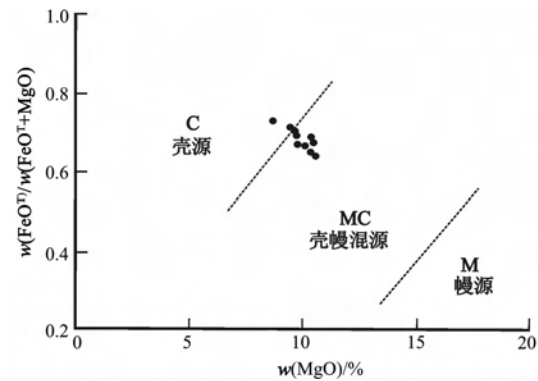


图6 黑云母的 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO}) - \text{MgO}$ 图(底图据周作侠,1986)
Fig. 6 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO}) - \text{MgO}$ diagram of biotites (after Zhou Zuoxia, 1986)

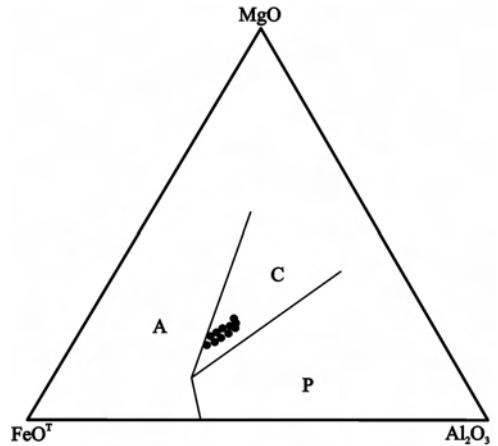


图7 黑云母 $\text{FeO}^T - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图(底图据 Abdel-Rahman, 1994)
Fig. 7 $\text{FeO}^T - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of biotite (after Abdel-Rahman, 1994)

A—非造山带碱性花岗岩中的黑云母所在区; P—过铝性花岗岩(包括 S 型)中黑云母所在区; C—造山带钙碱性花岗岩中黑云母所在区
A— area of biotite in alkali granite of the non-orogenic belt; P— area of biotite in peraluminous granites (including S -type); C— area of biotite in calc-alkaline granite of the orogenic belt

5.2 物理化学条件

角闪石的成分与母岩的成分、温度、压力环境有关,同一岩石中的角闪石,随温度升高, $(\text{Na} + \text{K})_{\text{A}}$ 和 Al^{IV} 增高,而 Al^{VI} 的增高反映了压力的增高(Journon *et al.*, 1989)。黑云母化学成分的变化则更是其寄主岩浆物理化学条件变化的综合体现(Guidotti, 1984; Hewitt and Wones, 1984; Speer, 1984),特定的岩浆只出现特定成分的云母(Abdel-Rahman, 1994)。另外同一演化系列的岩浆,从早期到晚期,云母成分又表现出渐变规律(孙世华,1988;Sun and Yu,2000; 张遵忠等,2004)。因此,角闪石、黑云母的化学成分可以对母岩形成的物理化学条件进行有效的约束。

由黑云母的电子探针分析结果(表4)可知, SiO_2 含量在 35.29% ~ 38.04% 之间,平均为 36.55%; TiO_2 含量变化范围为 3.61% ~ 4.67%, Al^{VI} 含量在 0 ~ 0.121 8 之间,黑云母的高钛和结构式中低 Al^{VI} 常指示其形成于相对高温和高 f_{O_2} 的介质环境(Buddington and Lindsley, 1964; Albuquerque, 1973)。本文

选用角闪石-黑云母矿物对温度图解(图8)和黑云母 $\text{Ti} - \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 温度图解(图9)对莱历斯高尔钼矿斑岩体的形成温度压力条件分别进行估算,前者显示其形成压力为 200 ~ 300 MPa,温度为 740 ~ 790℃,后者表明其结晶温度变化在 580 ~ 740℃ 之间。笔者认为岩体的角闪石-黑云母矿物对的计算结果比黑云母 $\text{Ti} - \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 温度计的计算结果更加合理,因为后一种方法得到的温度低于花岗岩固相线温度(700℃),可能反映岩浆演化的过程中黑云母 TiO_2 含量逐渐降低,导致估算温度偏低。另外,结合 Ma 等(1999)、龚松林等(2004)所述的矿物对估算压力范围适用的条件,选取角闪石全铝压力计(Hollister *et al.*, 1987)获得的 3571 铜矿斑岩体压力范围为 140 ~ 230 MPa,而莱历斯高尔钼矿斑岩体压力范围为 300 ~ 430 MPa,明显比 3571 铜矿斑岩体显示的壓力高,较角闪石-黑云母矿物对的计算结果略低,但考虑到误差因素,二者的计算结果仅能够作为斑岩体压力的参考。

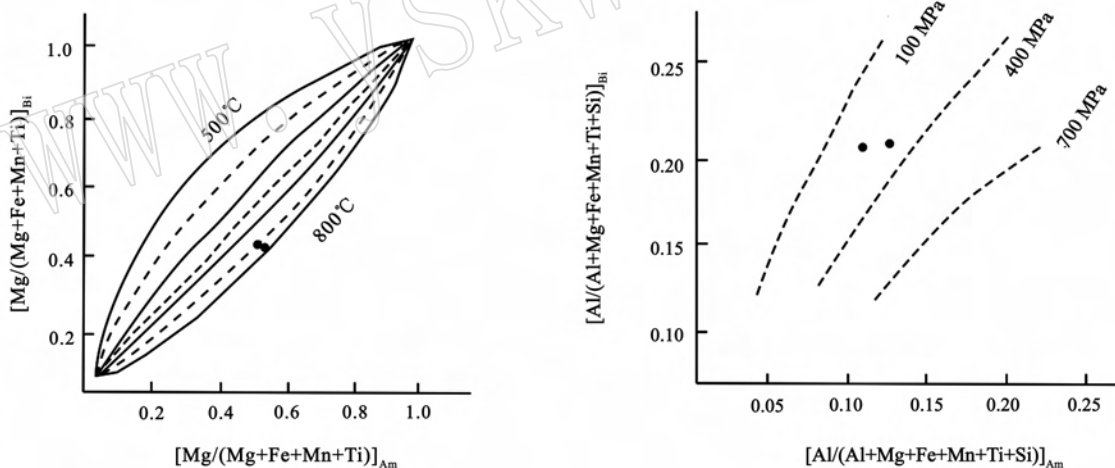


图8 共生角闪石-黑云母矿物对温度、压力图解(底图据林文蔚等,1998)

Fig. 8 Relationship of composition of coexisting amphibole-biotite to temperature and pressure (after Lin Wenwei *et al.*, 1998)

Wones 和 Eugster(1965)通过研究与磁铁矿和钾长石共生的黑云母 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 原子百分数来估计岩浆的氧逸度。在 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 三端员图解(图10)上可以看出,本区黑云母样品均落在 $\text{Ni} - \text{NiO}$ (NNO) 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$ (MH) 缓冲区之间,并且更靠近 $\text{Ni} - \text{NiO}$ (NNO) 缓冲线,表明本区斑岩体的氧逸度都高于 NNO 体系,形成于较高的 f_{O_2} 条件,与黑云母的高钛和低 Al^{VI} 所指示的高 f_{O_2} 介质环境一致。另外,根据斑岩体黑云母的 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值,利用

Wones 和 Eugster(1965)在 $p_{\text{H}_2\text{O}} = 207.0$ MPa 条件下提出的黑云母的 $\log f_{\text{O}_2} - t$ 图解(图11),求得莱历斯高尔一带斑岩体形成氧逸度($\log f_{\text{O}_2}$)为 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ Pa。

综上所述,本区斑岩体形成温度为 740 ~ 790℃,氧逸度为 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ Pa;3571 铜矿斑岩体压力范围为 140 ~ 230 MPa,而莱历斯高尔钼矿斑岩体压力范围为 300 ~ 430 MPa,前者的压力明显比后者要低。

5.3 指示找矿意义

斑岩型矿床通常产于大洋板块俯冲产生的岛弧、

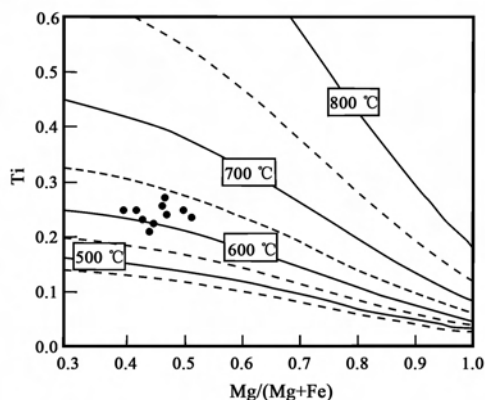


图9 黑云母 Ti - Mg/(Mg + Fe) 温度图解
(底图据 Henry 等, 2005)

Fig. 9 Ti - Mg/(Mg + Fe) geothermometric diagram of biotite
(after Henry *et al.*, 2005)

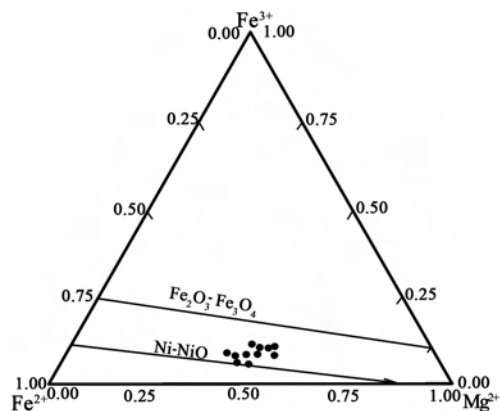


图10 黑云母 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}$ 三端员图解
(底图据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 10 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}$ diagram of biotite
(after Wones and Eugster, 1965)

陆缘弧环境和碰撞造山过程中 (Sillitoe, 1972; Karimpour and Atkinson, 1983; Defant *et al.*, 1993; 芮宗瑶等, 2004; 王强等, 2004)。从研究区地质背景和 张东阳等 (2008) 的研究成果可知, 本区属于典型的大陆弧环境, 具有十分有利的成矿地质条件。本区斑岩体以二长闪长斑岩-花岗闪长斑岩为主, 并且为 I 型花岗岩类, 此类斑岩体通常以成铜、金矿为主 (张洪涛等, 2004; 万博等, 2006)。

另外, 由于角闪石、黑云母分别具有特殊的链状、层状结构特点和多元素的广泛类质同像替换, 因此是许多成矿元素的载体和富集矿物, 其化学成分特点及其演化可以灵敏地指示不同矿化类型及其成矿关系, 并可作为某些矿床的找矿标志, 为找矿提供指示意义 (吕志成等, 2003a, 2003b)。如前所述, 莱尔斯高尔一带成矿斑岩体的角闪石 SiO_2 、 MgO 的成分均有偏高的现象, 这与吕志成等 (2003b) 提出的与铜矿有关的岩体中角闪石以富 Mg、Si 为特点的观点一致。Ishihara (1977, 1981)、Strech 和 Dilles (1998) 提出斑岩铜矿的岩浆应属于氧化型岩浆, 这是因为氧化型岩浆保证了硫化物不在早期阶段结晶导致分散。本区斑岩体形成于高 f_{O_2} 的介质环境, 且 $\log f_{\text{O}_2}$ 高出 Ni-NiO (NNO) 缓冲线, 指示本区是氧化型花岗岩, 这也为寻找斑岩型矿床提供了理论依据。结合两个成矿岩体的矿物学特征及形成时的物理化学条件可知, 3571 铜矿斑岩体比莱尔斯高尔钼矿斑岩体的侵位深度更浅些, 可以推测 3571 铜矿斑岩体相当于莱尔斯高尔钼矿的浅成相, 其深部可能存在类似钼矿, 与该区的地球化学的推论一致 (张东阳等, 2008)。

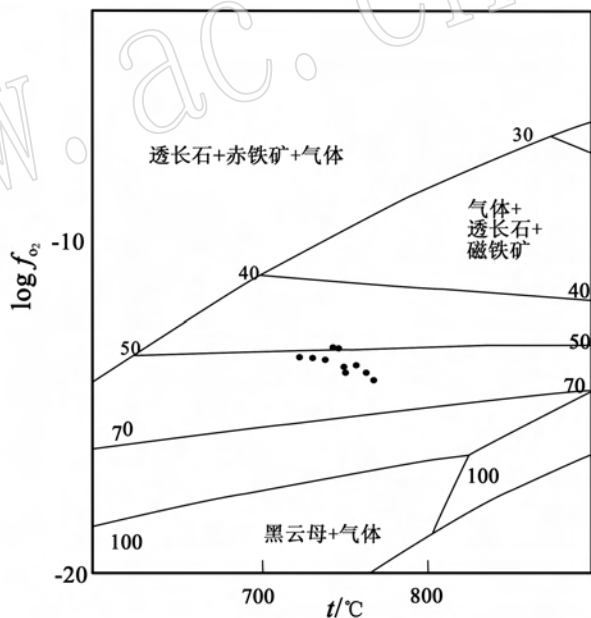


图11 黑云母的 $\log f_{\text{O}_2} - t$ 图解 (底图据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 11 $\log f_{\text{O}_2} - t$ diagram for biotite (after Wones and Eugster, 1965)

6 结论

(1) 莱尔斯高尔一带斑岩体以二长闪长斑岩为主, 其次为花岗闪长斑岩, 在矿物成分上以石英、钾长石、斜长石为主, 暗色矿物以角闪石、黑云母为主, 其中角闪石种属为阳起石、镁角闪石类型, 黑云母属于镁质黑云母-铁质黑云母。

(2) 本区岩石类型属于造山带钙碱性花岗岩, 形

成于相对高温、高 f_{O_2} 的环境,整体上本区斑岩体形成温度为 $740 \sim 790^\circ\text{C}$,氧逸度为 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ Pa;3571 铜矿斑岩体压力范围为 $140 \sim 230$ MPa,而莱历斯高尔钼矿斑岩体压力范围为 $300 \sim 430$ MPa,成岩物质主要来源于地壳,并且有少量地幔物质加入。

(3) 3571 铜矿斑岩体可能相当于莱历斯高尔钼矿的浅成相,其深部可能存在类似钼矿,具有钼矿的找矿前景。

致谢 野外工作得到新疆地矿局第六地质大队的邓洪涛副总工程师的帮助,在论文数据分析过程中得到中国地质大学(北京)地学实验中心相关老师的帮助,匿名审稿人也对稿件提出了宝贵的修改意见,在此向他们表示诚挚的感谢!

References

- Abdel-Rahman F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calcalkaline, and peraluminous magmas[J]. *J. Petrol.*, 35(2): 525 ~ 541.
- Albuquerque A C. 1973. Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal Geochemistry[J]. *Cosmochim. Acta*, 37: 1779 ~ 1802.
- Buddington A F and Lindsley D H. 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents[J]. *J. Petrol.*, 5: 310 ~ 357.
- Cai K Q, Sun N, Wang D Z, *et al.* 1984. Granite in South China and deposit [A]. Cai K Q and Tu G Z. *The Geology of Granite and Metallogenic Relationship*[C]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1 ~ 20.
- Chappel B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geol.*, 8: 173 ~ 174.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhou Xunruo, *et al.* 1993. Genetic Mineralogy and Gold Mineralogy of Guojialing Granodiorites from Eastern Shandong, China [M]. Beijing: China University of Geoscience Press, 1 ~ 131 (in Chinese with English abstract).
- Clemens J D and Wall V J. 1984. Origin and evolution of a peraluminous silicic ignimbrite suite: the violet town volcanics[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88: 354 ~ 371.
- Defant M J, Drummond M S and Mount S. 1993. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 21: 547 ~ 550.
- Ding Xiaoshi. 1988. The typomorphic characteristic of biotite and geological significance in all kinds of granite in in south central Tibet[J]. *Journal of the Deposit and Geological Institute in the Chinese Academy of Geology Science Deposit and Geological Institute*, (1): 33 ~ 50 (in Chinese).
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. *Geol. Surv. Prof. Paper*, 354-B: 11 ~ 49.
- Gong Songlin. 2004. The ancient uplift rate study of Huangling Pluton based on Al-in-hornblende Barometer[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 27(1): 52 ~ 58 (in Chinese with English abstract).
- Guidotti C V. 1984. Micas in metamorphic rock[A]. Bailey S E. *Micas (Review in Mineralogy, V. 13)* [C]. Washington D C: Mineralogy Society of America, 357 ~ 467.
- Henry D J, Guidotti C V and Thomson J A. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *Am. Mineral.*, 90: 316 ~ 328.
- Hewitt D A and Wones D R. 1984. Experimental phase relations of the Micas[A]. Bailey S E. *Micas (Review in Mineralogy, V. 13)* [C]. Washington D C: Mineralogy Society of America, 201 ~ 256.
- Hollister L S, Grissom G C and Peters E K. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of plutons[J]. *Am. Mineral.*, 72: 231 ~ 239.
- Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks [J]. *Mining Geology*, 27: 293 ~ 305.
- Ishihara S. 1981. The granitoid series and mineralization [J]. *Economic Geology*, 75: 458 ~ 484.
- Jourmon J, Triboulet C and Azema J. 1989. Amphibolites from Panama: anti-clockwise *P-T* Paths from a pre-upper cretaceous metamorphic basement in isthmian central American[J]. *Journal of metamorphic Geology*, (7): 539 ~ 546.
- Karimpour M H and At Kinson W W Jr. 1983. Petrogenesis of the A. O. porphyry copper complex in Jackson and Grand Counties, orthwestern Colorado[J]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 2: 5 ~ 27.
- Leake B E. 1978. Nomenclature of amphibole [J]. *Am. Mineral.*, (63): 1023 ~ 1052.
- Leake B E, Woolley A R and Arps C E S. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Mineral and Mineral Names[J]. *American Mineralogist*, 82: 1019 ~ 1037.
- Li Huaqin, Wang Denghong, Wan Que, *et al.* 2006. Isotopic geochronology study and its significance of the Lailisigao'er Mo deposit, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2437 ~ 2443 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenwei and Yin Xiulan. 1998. The forming physico chemical conditions of Linglong granitic complex and its geological significance[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 19(1): 40 ~ 49 (in Chinese with English abstract).
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Dong Guanghua, *et al.* 2003a. Mineral chemistry of biotite from granites related to different mineralization and occurred in two stages of Yenshanina period in South-Middle part of the Daxing'an mountains and its petro genetic and metallogenic significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(2): 177 ~ 184 (in Chinese with English abstract).
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, *et al.* 2003b. Mineral chemistry of amphiboles from granites related to different mineralization and occurred in two stages of Yenshanina period in South-Middle part of the Daxing'an mountains and its genetic and metallogenic significance[J]. *J. Mineral Petrol.*, 23(1): 5 ~ 10 (in Chinese with English abstract).

- Ma C Q. 1999. Magmatic Plumbing as a Window to Crustal Dynamics: An Example from the Dabieshan Ultradeep Metamorphic Rock Region, Central China[D]. Ph. D. Thesis, Åbo Akademi University Press, Turku/ Åbo.
- Michell A H. 1990. A review of compositional variation of amphiboles in alkaline plutonic Complexes[J]. *Lithos*, 26: 135 ~ 156.
- Rui Zongyao, Zhang Lisheng, Chen Zhenyu, *et al.* 2004. Discussion on the source rock or area of porphyry copper deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 229 ~ 238 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits[J]. *Econ. Geol.*, 67: 184 ~ 197.
- Speer J A. 1984. Micas in igneous rocks[A]. Bailey S E. *Micas (Review in Mineralogy, v. 13)*[C]. Washington D C: Mineralogy Society of America, 299 ~ 356.
- Streck J M and Dilles J H. 1998. Sulfur evolution of oxidized arc magmas as recorded in apatite from a porphyry copper batholith[J]. *Geology*, 26: 523 ~ 526.
- Sun S H and Yu J. 2000. Actual Fe-Li mica series as a series with Al^{VI} constant but not with Al^{IV} or Al^{VI} [J]. *Mineral Mag.*, 64(4): 755 ~ 775.
- Sun Shihua. 1988. Interpretation of chemical composition and subdivision of iron-lithium micas[J]. *Sci. Geol. Sinica*, 23(3): 213 ~ 228 (in Chinese with English abstract).
- Wan Bo and Zhang Lianchang. 2006. Geochemistry of ore-bearing porphyries in the Kalaxianger copper belt on the southeastern margin of the Altay Mountains, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 33(3): 618 ~ 625 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, *et al.* 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315 ~ 324 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhiliang, Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, *et al.* 2004. Types, characteristics and metallogenic evolution of the Paleozoic Polymetallic copper-gold deposits in the Western Tianshan Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 836 ~ 847 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B and Chappell B W. 1988. Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I-and S-type granites of Lachlan fold belt, southeast Australia[J]. *American Mineralogist*, 73(3~4): 281 ~ 296.
- White A J R and Chappel B W. 1983. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 159: 21 ~ 34.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application[J]. *Am. Mineral.*, 50: 1 228 ~ 1 235.
- Zhang Dongyang, Zhang Zhaochong, Ai Yu, *et al.* 2009. Geochronology, geochemistry of the ores-bearing porphyries in the Lailisiago'er region, western Tianshan: implications for their tectonic setting and mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica* (in press).
- Zhang Hongtao, Chen Renyi and Han Fanglin. 2004. Reunderstanding of metallogenic geological conditions of porphyry copper deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 150 ~ 163 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, Wang Shuo, *et al.* 2004. Composition and evolution of micas from different zones of the high-Rb and -F granite at Baishitouquan, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 33(5): 433 ~ 441 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1986. Genesis of Fengshandong massif of Hubei Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 59 ~ 70 (in Chinese).

附中中文参考文献

- 陈光远,孙岱生,周珣若,等. 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1 ~ 131.
- 丁孝石. 1988. 西藏中南部各类花岗岩中黑云母标型特征及其地质意义[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, (1): 33 ~ 50.
- 龚松林. 2004. 角闪石全铝压力计对黄陵岩体古隆升速率的研究[J]. 东华理工学院学报, 27(1): 52 ~ 58.
- 李华芹,王登红,万 颀,等. 2006. 新疆莱尔斯高尔铜铅矿床的同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2 437 ~ 2 443.
- 林文蔚,殷秀兰. 1998. 玲珑花岗质杂岩体形成的物理化学条件及其地质意义[J]. 地球学报, 19(1): 40 ~ 49.
- 吕志成,段国正,董广华. 2003a. 大兴安岭中南段燕山期三类不同成矿花岗岩黑云母的化学成分特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物学报, 23(2): 177 ~ 184.
- 吕志成,段国正,郝立波,等. 2003b. 大兴安岭中南段燕山期两类不同成矿花岗岩角闪石的化学成分及其成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 23(1): 5 ~ 10.
- 芮宗瑶,张立生,陈振宇,等. 2004. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨[J]. 岩石学报, 20(2): 229 ~ 238.
- 孙世华. 1988. Fe-Li 云母化学成分的解析和分类[J]. 地质科学, 23(3): 213 ~ 228.
- 万 博,张连昌. 2006. 新疆阿尔泰南缘卡拉先格尔铜矿带含矿斑岩地球化学及其成矿意义[J]. 中国地质, 33(3): 618 ~ 625.
- 王 强,赵振华,简 平,等. 2004. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 20(2): 315 ~ 324.
- 王洁民,刘振声. 1988. 西藏花岗岩类中黑云母的特征[J]. 矿物岩石, 8: 66 ~ 71.
- 王志良,毛景文,张作衡,等. 2004. 西天山古生代铜金多金属矿床类型、特征及其成矿地球动力学演化[J]. 地质学报, 78(6): 836 ~ 847.
- 徐克勤,孙 鼐,王德滋,等. 1984. 华南花岗岩与成矿[A]. 徐克勤,涂光炽. 花岗岩地质和成矿关系(国际学术会议论文集)[C]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1 ~ 20.
- 张东阳,张招崇,艾 羽,等. 2009. 西天山莱尔斯高尔一带铜(铅)矿成矿斑岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报(待刊).
- 张洪涛,陈仁义,韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件[J]. 矿床地质, 23(2): 150 ~ 163.
- 张遵忠,顾连兴,王 硕,等. 2004. 新疆白石头泉高铷氟花岗岩不同相带云母成分及其演化[J]. 地球化学, 33(5): 433 ~ 441.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1): 59 ~ 70.