

新疆阿尔泰巴斯铁列克钨多金属矿区花岗岩黑云母特征及成岩成矿意义^{*}

柴凤梅¹, 李永², 王雯³, 包长甲³, 祁冬梅³, 张雪冰³, 田猛²

(1 天津城建大学, 天津 300384; 2 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

3 新疆大学新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要 黑云母是花岗质岩石中常见的造岩矿物,其成分可以有效指示花岗岩形成的物理化学条件和岩石成因。巴斯铁列克矿床是近年来在新疆阿尔泰造山带南缘发现的首例二叠纪矽卡岩型钨多金属矿床。矿区出露多种类型二叠纪含钨花岗岩。为理清花岗质岩体之间、岩体与钨多金属矿化之间的关系,文章采用电子探针测定了黑云母花岗岩、二长花岗岩、二云母花岗岩和钾长花岗岩中的黑云母成分。结果表明,所有黑云母具有富铁、高铝、贫镁特征,含铁指数($Fe^{2+}/(Mg+Fe^{2+})$)为0.66~0.80,二云母花岗岩属铁质黑云母而黑云母花岗岩、二长花岗岩和钾长花岗岩属铁叶黑云母。所有岩石是具有A型特征的I型花岗岩。不同类型岩石中黑云母的成分差异与岩浆来源、分异演化程度有关。二云母花岗岩中黑云母的 $w(MgO)$ 与结晶温度最高,与黑云母平衡流体的 $\log(fHF/fHCl)$ 值(-1.13~-1.25)最低, $\log(fH_2O/fHF)$ 值(4.64~4.96)最高,母岩浆相对富Cl;黑云母花岗岩中 $\log(fHF/fHCl)$ 值最高, $\log(fH_2O/fHF)$ 最低,与二长花岗岩是同一岩浆房不同演化阶段的产物,与二云母花岗岩和钾长花岗岩属不同的岩浆体系,母岩浆相对富F元素。黑云母花岗岩与W矿化关系更密切。

关键词 地球化学;黑云母;岩浆流体;岩石成因;钨多金属矿;巴斯铁列克

中图分类号:P588.12⁺1;P618.67

文献标志码:A

Geochemical characteristics of biotite from granites around Bastielieke W-polymetallic deposit in Altay, Xinjiang and its implication

CHAI FengMei¹, LI Yong², WANG Wen³, BAO ChangJia³, QI DongMei³, ZHANG XueBing³ and TIAN Meng²

(1 Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration, Xinjiang Nonferrous Metals Geoexploration Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3 Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract

Biotite is an important rock-forming mineral in granitoids, and is also a good proxy for chemical and physical conditions associated with crystallization from the magma, and petrogenesis. The Bastielieke deposit is a medium-size W-polymetallic skarn deposit in Xinjiang Altay. Its skarn ores are mainly hosted at/near the contact between the Kangbutiebao and Permian granites. Permian granitoids are composed of several pulses of magmas. However, the interrelationship of these different granites, specific intrusive phases related to mineralization is little known. Electron microprobe analyses on primary magmatic biotites from biotite granite, monzogranite, two-mica granite, and K-feldspar granite are performed to investigate magmatic processes, associated hydrothermal fluids, and contributions to mineralization. The results show that the magmatic biotite grains have $X_{Fe} [=Fe^{2+}/(Mg+$

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41872072)和新疆自然科学基金项目(编号:2020D01C074)共同资助

第一作者简介 柴凤梅,女,1971年生,教授,主要从事岩石学、矿床学的教学与研究工作。Email: chaifengmei@163.com

收稿日期 2022-05-15;改回日期 2022-12-26。赵海杰编辑。

$\text{Fe}^{2+}]$ values ranging from 0.66 to 0.80, and they belong to ferri-biotite in two-mica granite and siderophyllite in other three intrusions. These granites are similar to the geochemical behavior of the fractionated I- and A- type granitoids. The magma source and fractional crystallization degree may be responsible for the differentiation of biotite compositions. Compared with other three intrusions, two-mica granite appears to have higher MgO contents and magmatic temperatures. The halogen fugacity of magmatic fluid calculated from biotite composition has the lowest $\log(f\text{HF}/f\text{HCl})$ ratios ($-1.13\sim-1.25$) and highest $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ ratios ($4.64\sim4.96$), showing high Cl in fluids. The biotite granite shows the highest $\log(f\text{HF}/f\text{HCl})$ ratios ($-0.59\sim-0.81$) and lowest $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ ratios ($4.18\sim4.52$), and displays a differentiation trend from monzogranite, indicating their same magma origin. Biotite granite and monzogranite have different magma source and fractional crystallization degree from two-mica granite and K-feldspar granite. Biotite granite is favorable for W mineralization due to the highest evolution degree and high F in fluids.

Key words: geochemistry, biotite, magmatic fluid, petrogenesis, W-polymetallic deposit, Bastielicke

花岗质岩浆的物理化学条件(如温度、氧逸度、挥发分组成和含量等)可以反映岩浆演化和固结成岩过程,也对成矿金属元素(如W、Cu、Mo和Sn等)在熔体-流体中的分配、迁移和富集具有重要影响(Candela, 1992; 李鸿莉等, 2007)。黑云母是花岗质岩石中常见的造岩矿物之一,具有硅氧四面体(T)与八面体(O)以T-O-T方式相间连接的层状结构,层间阳离子(主要为 K^+ 、 Na^+ 、 Li^+ 、Nb、Ta和Sn等)和八面体阳离子(主要为 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 等)(王汝成等, 2019)对岩浆的物理化学条件(成分、温度、压力和氧逸度等)变化异常敏感(Wones et al., 1965; Abdel-Rahman, 1994; 张振等, 2019),其成分可以很好的反映寄主岩浆性质、结晶条件和分异演化程度(Wones et al., 1965; Webster et al., 1990; Munoz, 1992; Abdel-Rahman, 1994; Henry et al., 2005),而且阴离子位置OH、F和Cl可以反映岩浆演化分异流体特征(Yang et al., 2005; Zhang et al., 2016)。因此,黑云母成分常被用来研究岩浆源区和构造环境(Abdel-Rahman, 1994; Kumar et al., 2010),也广泛用于研究花岗质岩浆演化与铜(钼)矿床(张振等, 2019; Azadbakht et al., 2020; 郑瑜林等, 2022)、钨(钼-锡)矿床(Van Middelaaar et al., 1990; 李鸿莉等, 2007; Rasmussen et al., 2013; Zhang et al., 2016)、金矿床(Coulson et al., 2001; Yang et al., 2005)的关系。

新疆阿尔泰造山带是中国重要的铁、铜、金、铅锌和稀有金属成矿带。巴斯铁列克钨多金属矿床是新疆阿尔泰造山带发现的首个钨多金属矿床。目前已探明钨金属量2.19万t,共生和伴生铜金属量2684 t,锌金属量1.3万t(张永智等, 2019)。杨

富全等(2019)报道了该矿床石榴子石矽卡岩中辉钼矿的Re-Os等时线年龄为(284.4 ± 5.5) Ma,切穿矿体的伟晶岩锆石U-Pb年龄为(275.4 ± 5.5) Ma。张国锋等(2019)报道了矿床中的主要矿物为钙铝榴石、钙铁辉石、透辉石、铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铜矿、自然铋和辉银矿。Yang等(2021)对成矿流体特征开展研究,认为巴斯铁列克属还原性矽卡岩型矿床,水岩反应和大气降水混合是导致成矿的主要机制。包长甲等(2021)和Zhang等(2022)报道了矿区至少存在2期花岗岩($284\sim275$ Ma),母岩浆主要来源于新生地壳与地幔熔融物质。野外地质调查表明,巴斯铁列克钨多金属矿化主要分布在黑云母花岗岩与康布铁堡组接触带的矽卡岩。然而,矿区发育多个W和Cu含量明显有别的不同类型花岗质岩石(包长甲等, 2021; Zhang et al., 2022),这些岩体的成岩过程、不同岩体间的关系、岩体与矽卡岩矿化间的关系尚不清楚,包括岩浆作用是否对W有富集作用? 岩体是否存在有利于成矿金属元素迁移富集的流体环境? 这些不同类型花岗岩是否有不同金属元素的含矿差异?

本文在详细的野外和室内岩相学观察基础上,选择巴斯铁列克矿区出露的花岗岩,利用电子探针分析技术,对不同类型花岗岩中的黑云母开展成分研究,通过寄主岩浆性质、挥发分组成以及与熔体平衡的流体特征,研究岩石成因类型,揭示各岩体间的关系,探讨岩体与矿化的关系,为约束钨多金属成矿作用过程提供依据,也为阿尔泰造山带南缘二叠纪岩浆活动与成矿研究提供资料。

1 地质特征

1.1 区域地质背景

阿尔泰造山带位于中亚造山带南缘,呈北西-南东向横贯于中、俄、哈、蒙 4 国,构造上处于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块接合部位。阿尔泰造山带被北西-南东向断裂大致分为北、中、南 3 个块体(图 1a, Xiao et al., 2004)。巴斯铁列克钨多金属矿床位于南阿尔泰块体的克兰盆地。盆地内出露的地层主要有中-上志留统库鲁木提群变质岩,上志留

统一下泥盆统康布铁堡组变质火山沉积岩,中泥盆统阿勒泰镇组浅变质火山沉积岩,其中康布铁堡组是主要赋矿地层,发育有阿巴宫铁矿、铁木尔特铅锌铜矿、塔拉特铅锌铁矿、恰夏铁铜矿、萨热阔布金矿等;此外,在阿勒泰镇组发育红墩铅锌矿床(图 1b)。盆地内岩浆岩以奥陶纪和二叠纪花岗岩最为发育,其中奥陶纪花岗岩出露面积不大,多已发生构造变形。二叠纪侵入岩出露面积相对较广,集中形成于 286~268 Ma(王涛等, 2005; 刘锋等, 2009; 李强等, 2019; Zhang et al., 2021),岩体基本未变形,主要呈不规则圆形、椭圆形,多切割区域构造线(王涛等,

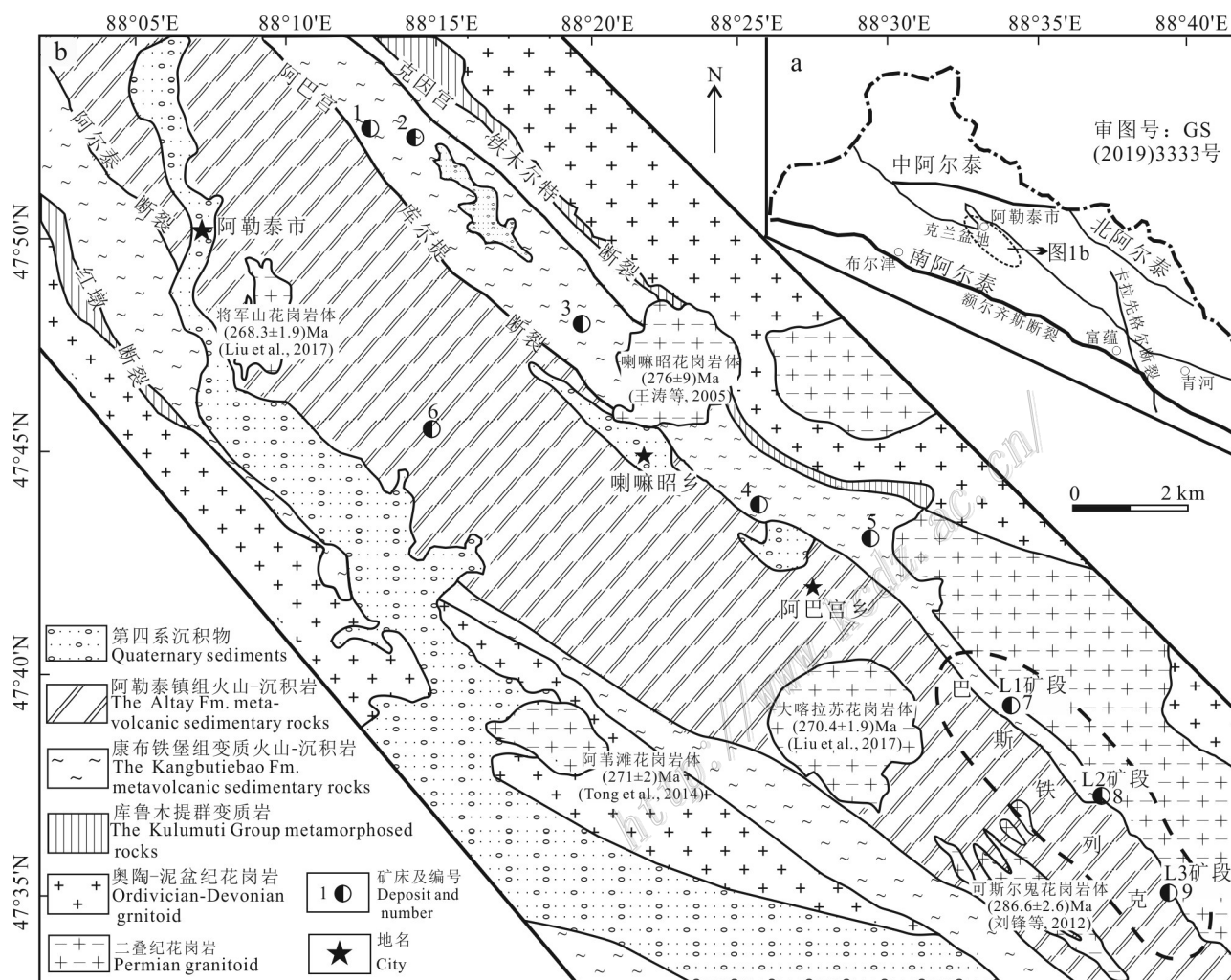


图 1 新疆阿尔泰区域地质简图(a)和阿尔泰造山带南缘克兰盆地地质简图(b, 据 Windley et al., 2002; 黄承科等, 2007 修改)
矿床名称: 1—萨热阔布金矿; 2—恰夏铁铜矿; 3—铁木尔特铅锌铜矿; 4—阿巴宫铁矿; 5—塔拉特铅锌铁矿; 6—红墩铅锌矿; 7~9—巴斯铁列克钨多金属矿床

Fig.1 Simplified regional geological map of the Chinese Altay(a) and geological map Kelan Basin in the southern margin of the Chinese Altay Orogenic Belt (b, modified after Windley et al., 2002; Huang et al., 2007)

Names of ore deposits: 1—Sarekuobu Au deposit; 2—Qiaxia Fe-Cu deposit; 3—Tiemuerte Pb-Zn-Cu deposit; 4—Abagong Fe deposit; 5—Talat Pb-Zn-Fe deposit; 6—Hongdun Pb-Zn deposit; 7~9—Bastielieke tungsten polymetallic deposit

2005),主要岩石类型有黑云母二长花岗岩、二云母花岗岩和钾长花岗岩,具有高钾钙碱性岩石特征,属I-A过渡型和A型花岗岩(王涛等, 2005; 童英等, 2010; 刘锋等, 2012; Liu et al., 2017; 李强等, 2019; Zhang et al., 2021)。

1.2 矿区地质

巴斯铁列克矿床位于克兰盆地南东。矿区出露地层为上志留统一下泥盆统康布铁堡组第二岩性段,主要为浅粒岩、变粒岩、大理岩和黑云石英片岩。矿体赋存于二叠纪花岗岩体与康布铁堡组中的矽卡岩。地表出露的矿化带长约16 km,宽50~150 m,矿化带由北西向南东划分为L1、L2和L3共3个矿段,共圈出3条钨矿体、10条钨铜(锌)矿体、4条铜矿体和1条锌矿体。矿区出露的花岗质岩石在地表呈不规则岩株和岩枝产出,岩体边部呈港湾状,面积约7.74 km²,主要分布于阿巴宫断裂北侧,沿NW-SE向延伸,侵位于康布铁堡组火山-沉积岩中,与地层呈断层接触(张永智等, 2019)。

矿区花岗岩类型较多,主要有黑云母花岗岩、似斑状二长花岗岩、二云母花岗岩、钾长花岗岩、白云母花岗岩和含电气石花岗岩。各岩体规模不大,岩体之间穿切关系复杂,多属于高 $w(\text{SiO}_2)$ ($>75\%$)的高分异富氟过铝质岩石(包长甲等, 2021)。根据野外观察与锆石U-Pb定年结果,黑云母花岗岩($(284.2\pm 1.1)\text{Ma}$)和似斑状二长花岗岩($(284.7\pm 1.2)\text{Ma}$)早于二云母花岗岩($(281.8\pm 1.6)\text{Ma}$)、钾长花岗岩($(275.0\pm 1.6)\text{Ma}$)、白云母花岗岩($(275.4\pm 1.1)\text{Ma}$)和含电气石花岗岩($(275.2\pm 1.4)\text{Ma}$)侵入(包长甲等, 2021; Zhang et al., 2022及内部未刊资料)。黑云母花岗岩、二长花岗岩、二云母花岗岩和钾长花岗岩中 $w(\text{W})$ ($4.6\times 10^{-6}\sim 169\times 10^{-6}$)远高于上地壳(1.9×10^{-6})与地球的平均值(0.7×10^{-6}) (Rudnick et al., 2003)(包长甲等, 2021; Zhang et al., 2022)。L2矿段黑云母花岗岩与地层接触带发育矽卡岩化蚀变和钨多金属矿化。矿体呈透镜状和似层状产出,与围岩地层产状基本保持一致(李永, 2018)。矿体厚度约3.76~9.08 m,其中 WO_3 品位0.19%~0.31%,铜平均品位0.23%~0.51%,锌平均品位0.45%~11%(张永智等, 2019)。其他岩体未见明显矿化。在钻孔深部见有隐伏的细粒二云母花岗岩(未见底)。矿区内也可见多条切穿矿体的伟晶岩脉分布(图2)。矿区发育硅化、碳酸盐化和矽卡岩化蚀变,其中矽卡岩化与矿化有关。主要矿石矿物为白钨矿、黄铜矿、闪锌矿

和辉钼矿,其次有磁黄铁矿和黄铁矿,偶见自然铋、辉银矿(张国锋等, 2019)。白钨矿主要呈星点状、浸染状分布于矽卡岩,偶见分布于切穿矽卡岩的萤石-石英脉中,黄铜矿、闪锌矿主要分布于石英硫化物脉中(图3a~c)。

2 岩相学特征

本文选取巴斯铁列克矿区L2矿段黑云母花岗岩、二长花岗岩、二云母花岗岩和钾长花岗岩中的黑云母开展研究。样品包括地表样品和钻孔样品。各类岩性特征如下。

黑云母花岗岩(图3d~f):岩石呈灰白色,细粒花岗结构,块状构造,主要由碱性长石(35%)、斜长石(15%)、石英(35%)、黑云母(13%)和少量白云母组成。长石主要为钾长石和钠长石,部分长石已发生泥化蚀变。黑云母具褐色-褐黑色多色性,大小悬殊,介于0.1~0.4 mm之间,呈片状分布于长石和石英颗粒间,局部蚀变为绿泥石和白云母,偶见自形鳞片状小晶体被石英和长石包裹。副矿物主要有锆石、磷灰石和钛铁矿等,个别样品中可见自形岩浆成因锰铝榴石和他形白钨矿(Chai et al., 2023)。

二长花岗岩(图3g~i):岩石呈灰白色,似斑状结构,块状构造。斑晶主要由石英、碱性长石、斜长石、黑云母、白云母组成,基质成分与斑晶一致。其中碱性长石主要为微斜长石(35%),多已发生高岭土化;斜长石(25%)主要为钠长石和更长石,多已发生绢云母化蚀变;石英(30%)呈他形粒状,裂理发育;黑云母(8%)呈自形-半自形鳞片状,褐黄色-褐色多色性,大小约0.2~1 mm,长宽比变化大,介于1:1~1:2之间,多分布在其他矿物边缘,偶见边缘和解理缝发生绿泥石化蚀变。副矿物主要有锆石、磷灰石和钛铁矿,偶见自形石榴子石。

细粒二云母花岗岩(图3j~l):位于L2矿段ZK-0803钻孔159 m处。岩石呈灰白色,细粒花岗结构,块状构造,主要由石英(30%)、碱性长石(约35%)、斜长石(20%)、少量黑云母和白云母(20%)组成。碱性长石主要为微斜长石和少量条纹长石,偶见微文象结构;斜长石主要为更长石。黑云母呈褐黄色-褐黑色多色性,0.1~0.5 mm鳞片状分布于石英和长石间,与其伴生的白云母呈大的片状。副矿物有锆石、磷灰石、榍石和磁铁矿($<1\%$)。

钾长花岗岩(图3m~o):岩石呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,主要由石英(30%)、碱性长石(约40%)、斜长石(15%)、少量黑云母和白云母(15%)组成。碱性长石包括条纹长石和微斜长石,斜长石主要为钠长石。局部可见似斑状结构。黑云母呈棕褐色-褐黑色多色性,0.5~1 mm鳞片状分布于石英和长石间,偶见被石英和长石包裹。副矿物有锆石、磷灰石、榍石和钛铁矿(<1%),偶见锰铝榴石。

综上,巴斯铁列克矿区花岗岩均含有黑云母,呈棕褐色-褐黄色-褐黑色多色性。钾长花岗岩与二云母花岗岩中黑云母相对新鲜,主要呈半自形-他形长鳞片状分布于石英和长石晶体间隙,长宽比

接近2:1~4:1,偶见自形小晶体被石英长石斑晶包裹;黑云母花岗岩与二长花岗岩中的黑云母多呈半自形晶-他形晶,粒度相对小,长宽比接近1:1~2:1。

3 黑云母成分分析

黑云母电子探针分析在自然资源部第二海洋研究所自然资源部海底科学重点实验室完成。分析仪器采用日本电子Jeol公司的JXA-8100型电子探针分析仪。工作中的加速电压为15 kV,束流为20 nA(微量元素分析时束流100 nA),束斑直径10 μm ,极小矿物使用聚焦电子束。测试中使用美国SPI公司提供的标样。所有测试数据均经过了ZAF校正。各

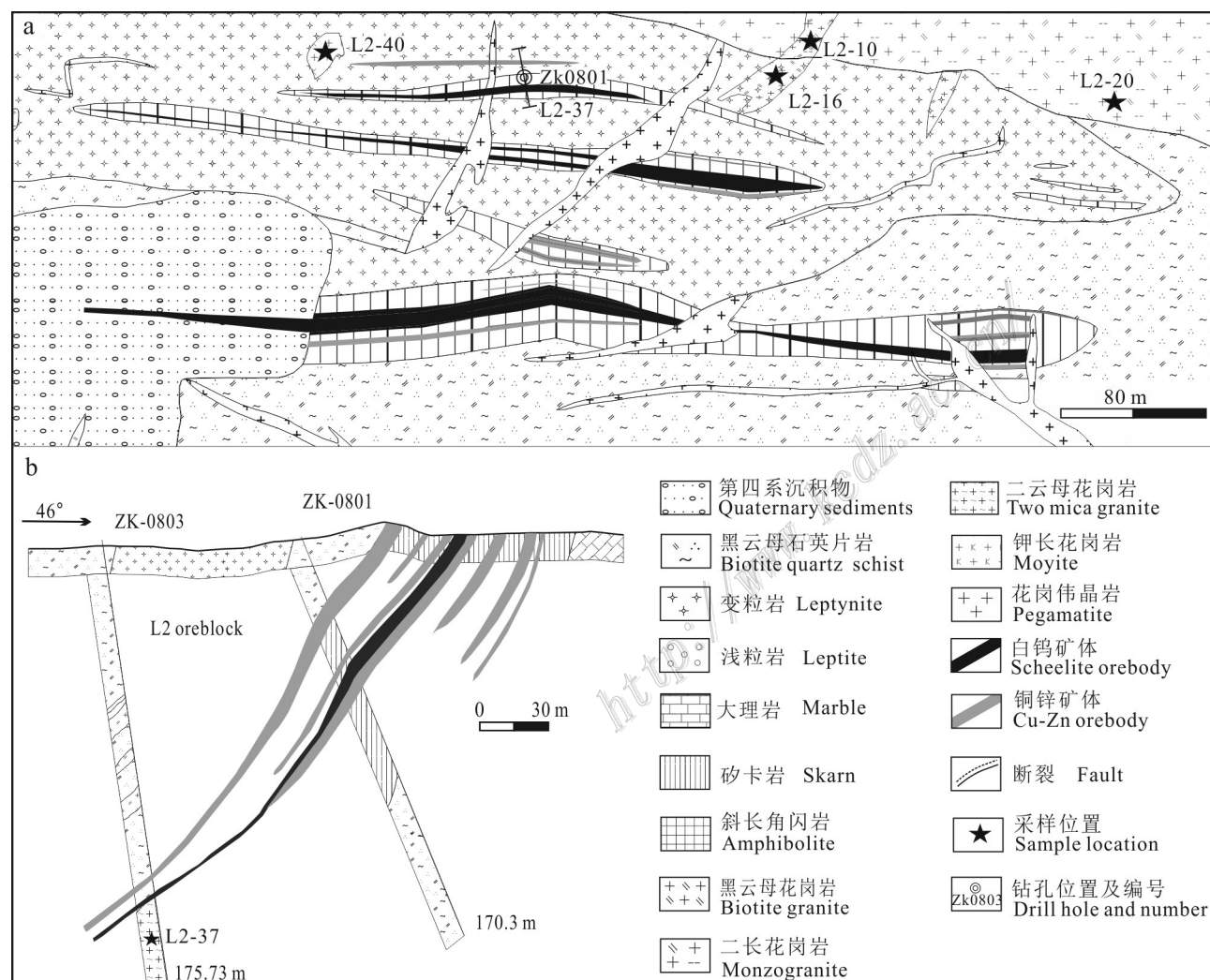


图2 巴斯铁列克钨多金属矿区L2矿段地质简图(a)及08号勘探线剖面图(b)(据张永智等,2019修改)

Fig. 2 Geological sketch map of L2 ore block in the Bastieliek tungsten polymetallic deposit (a) and geological section along No.08 exploration line (b) (modified after Zhang et al., 2019)

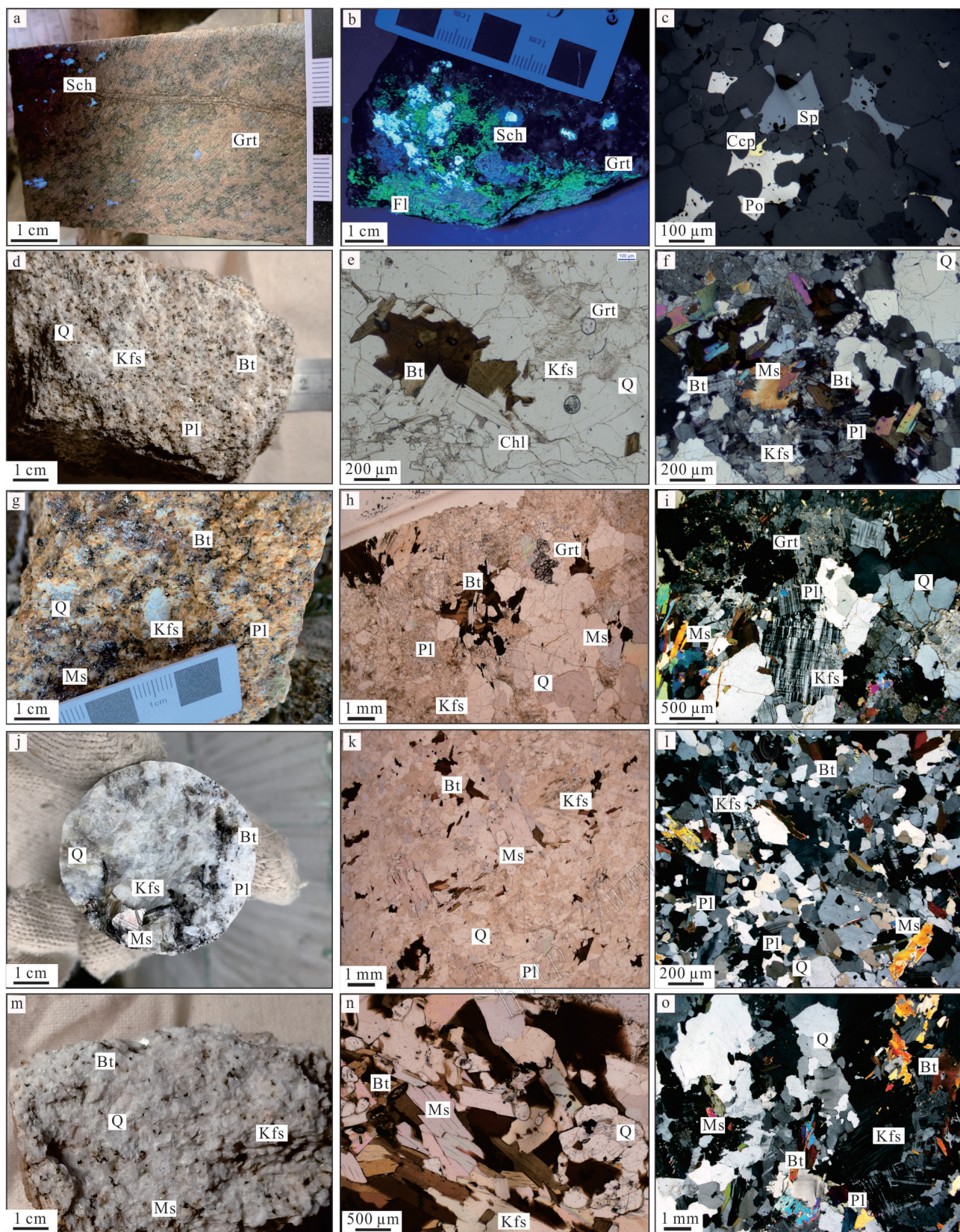


图3 巴斯铁列克钨多金属矿床矿化特征及矿区花岗岩石照片

a. 砂卡岩中稀疏浸染状白钨矿(紫外光照射); b. 穿切砂卡岩的萤石石英脉中白钨矿(紫外光照射); c. 石英-硫化物脉中闪锌矿、磁黄铁矿交代黄铜矿; d. 黑云母花岗岩手标本; e. 黑云母花岗岩中褐黑色黑云母与白云母分布于长石间隙或被石英包裹(-); f. 黑云母花岗岩中石英、钾长

石、斜长石、黑云母和白云母(+);g. 似斑状二长花岗岩手标本;h. 二长花岗岩中棕褐色半自形-自形黑云母与石榴子石,个别黑云母发生绿泥蚀变(-);i. 二长花岗岩中微斜长石、斜长石和石英斑晶,石英包裹自形黑云母小晶体(+);j. 钻孔深处细粒二云母花岗岩手标本;k. 花岗岩中棕褐色自形-半自形黑云母和鳞片状白云母分布于长石和石英间隙(-);l. 二云母花岗岩中钾长石、斜长石、黑云母和白云母组合,钾长石以微斜长石和条纹长石为主,局部发育文象结构;m. 钾长花岗岩手标本;n. 自形棕褐色黑云母和白云母略显定向性(-);o. 微斜长石与石英间隙分布细粒黑云母和白云母(+)

Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母;Ms—白云母;Grt—石榴子石;Ccp—黄铜矿;Po—磁黄铁矿;Sp—闪锌矿;

Fl—萤石;Sch—白钨矿

Fig. 3 Representative photographs showing mineralization features, texture and mineralogy of the granitoids in the Bastielieke W-polymetallic deposit

a. Disseminated scheelite in skarn under ultraviolet light; b. Scheelite in quartz-fluorite vein cutting skarn under ultraviolet light; c. Chalcopyrite-sphalerite-pyrrhotite in pyrite-quartz veinlets cutting pyroxene skarn; d. Grayish white biotite granite with fine-grained texture. Hand specimen; e. Brown black biotite and muscovite distributed within feldspar, and biotite inclusion in quartz grain in biotite granite under monpolarized light; f. Quartz, biotite, muscovite, K-feldspar and plagioclase assemblages in biotite granite under under cross polarized light; g. Grayish white porphyritic monzogranite. Hand specimen; h. Brown black euhedral-subhedral biotite with chloritized alteration and garnet in porphyritic monzogranite under monpolarized light; i. Microcline, plagioclase and quartz phenocrysts with euhedral biotite enclosed by quartz in monzogranite under cross polarized light; j. Two mica granite from the deeper part of drill core. Hand specimen; k. Brown black biotite and muscovite in interstitial of feldspar and quartz in two mica granite under monpolarized light; l. Microcline, plagioclase and quartz assemblages with perthitic texture and graphic texture in two mica granite under cross polarized light; m. Fine-grained alkali feldspar granite. Hand specimen; n. Euhedral brown black biotite and muscovite with oriented distribution in alkali feldspar granite under monpolarized light; o. Biotite and muscovite in interstitial of alkali feldspar and quartz in alkali feldspar granite under cross polarized light

Q—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; Ms—Muscovite; Grt—Garnet; Ccp—Chalcopyrite; Po—Pyrrhotite; Sp—Sphalerite;

Fl—Flourite; Sch—Scheelite

元素平均检测限(%)分别为:Na (0.010)、K (0.007)、Ca (0.008)、Mn (0.029)、Mg (0.010)、Fe (0.035)、Al (0.016)、Si (0.015)、Ti (0.023)、F (0.033)、Cl (0.005)、P (0.013)、W (0.109)、Ni (0.036)。

黑云母电子探针分析结果列于表 1。51 个分析点的氧化物质量分数之和介于 93.9%~97.9% 之间,在黑云母电子探针分析数据的允许误差范围内。 Fe_2O_3 和 FeO 含量采用林文蔚等(1994)计算方法进行了调整,以 22 个氧原子为基础计算了阳离子数和相关参数。

所有黑云母的 $w(\text{SiO}_2)$ 相近 (34.0%~37.2%), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化不大 (16.5%~18.05%), $w(\text{TiO}_2)$ 和 $w(\text{MgO})$ 低 (分别为 2.23%~3.13% 和 3.33%~7.29%), $w(\text{FeO}^\text{T})$ 高 (23.5%~27.6%), 显示了富 Fe ($X_{\text{Fe}}=0.66\sim0.80$)、高 Al、贫 Mg 和 Ti 的特征。不同岩石类型中黑云母 $w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{TiO}_2)$ 明显有别,二云母花岗岩中的 $w(\text{FeO}^\text{T})$ 最低 (21.9%~23.3%)、 $w(\text{MgO})$ (6.44%~7.29%) 和 Ti 离子数 (平均 0.35) 最高,黑云母花岗岩中的 $w(\text{MgO})$ (3.35%~3.78%) 明显低于二长花岗岩中的 $w(\text{MgO})$ (3.96%~4.50%)。其余样品的 Ti 离子数 (平均 0.31) 相差不大 (表 1)。所有样品的 $w(\text{CaO})$ 极低 (<0.09%), 同一类型岩石中黑云母的含铁系数 ($(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+})/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$) 比值均一,表明黑云母未遭受后期流体改造 (Stone, 2000; 郭耀宇等,

2015)。在黑云母的 TiO_2 -(FeO+MnO)-MgO 分类图解上 (图 4a), 所有样品位于原生黑云母区。与岩相学显示的半自形-自形片状,褐色-褐黄色-褐黑色多色性等原生黑云母特征 (Nachit et al., 2005) 一致。依据 Foster (1960) 的黑云母分类,所有样品属于富铁黑云母,而在黑云母的 Mg^{2+} -($\text{Al}^\text{VI}+\text{Fe}^{3+}+\text{Ti}^{4+}$)-(Fe $^{2+}$ +Mn $^{2+}$) 分类图上 (图 4b), 二云母花岗岩位于铁质黑云母区,黑云母花岗岩、二长花岗岩和钾长花岗岩位于铁叶黑云母区。此外,基于分子式计算,所有黑云母均含有一定量的 H_2O , 不同类型岩石中黑云母中 H_2O 含量变化不大,主要介于 3.24%~3.69% 之间。所有黑云母呈现富 F、低 Cl 特征,不同类型岩石黑云母的 F 和 Cl 含量差别较大 (表 1), 其中二云母花岗岩黑云母中 $w(\text{F})$ (1.12%~1.41%) 最高,钾长花岗岩黑云母中 $w(\text{F})$ (0.51%~0.71%) 最低。黑云母花岗岩与二长花岗岩的黑云母中 $w(\text{F})$ (0.84%~1.23% 和 0.57%~0.89%) 相当。

4 岩浆结晶物理化学条件

前已述及,所有分析的黑云母均属岩浆成因,它们的化学成分可以反映岩浆结晶时的温度、压力和挥发分组成等条件 (Nachit et al., 2005; 张振等, 2019)。

表 1 巴斯铁列克钨多金属矿区花岗岩中黑云母电子探针成分分析结果(w(B)/%)

Table 1 Electron microprobe analyses data (w(B)/%) of representative biotites from grnitoids in the Bastielieke tungsten polymetallic deposit

组分	L2-10-1-1	L2-10-1-2	L2-10-1-3	L2-10-3-1	L2-10-3-2	L2-16-6-1	L2-16-6-2	L2-16-6-3	L2-16-7-1	L2-16-7-2	L2-16-7-3
黑云母花岗岩											
SiO ₂	34.83	35.00	35.00	34.68	34.80	37.18	36.66	36.02	35.52	36.28	36.16
TiO ₂	2.597	2.672	2.652	2.743	2.525	2.624	2.787	2.818	2.901	2.676	2.745
Al ₂ O ₃	17.46	18.05	17.60	17.16	16.81	17.39	17.71	17.30	17.29	16.87	17.23
Fe ₂ O ₃	3.52	3.77	3.78	3.66	3.52	4.30	4.23	4.10	4.09	4.28	4.27
FeO	24.20	24.34	24.45	24.82	25.00	19.69	19.03	20.59	21.24	20.05	20.33
MnO	0.674	0.445	0.398	0.44	0.476	0.41	0.326	0.367	0.45	0.407	0.538
MgO	3.431	3.394	3.553	3.378	3.775	3.84	3.785	3.982	3.327	3.551	3.347
CaO	0.03	0.044	0.032	0.012	0.028	0.055	0.025	0.046	0.074	0.052	0.038
Na ₂ O	0.135	0.087	0.067	0.095	0.018	0.165	0.143	0.21	0.308	0.172	0.19
K ₂ O	9.959	9.833	9.691	9.696	9.727	9.502	9.586	9.505	9.448	9.217	9.312
WO ₃	-	0.237	0.245	-	0.258	0.246	0.197	-	0.105	0.134	0.165
H ₂ O ⁺	3.30	3.32	3.32	3.27	3.21	3.49	3.41	3.41	3.40	3.38	3.41
F	1.066	1.123	1.092	1.092	1.234	0.844	0.947	0.908	0.837	0.884	0.847
Cl	0.075	0.06	0.074	0.093	0.08	0.056	0.047	0.059	0.05	0.045	0.054
以 22 个氧原子为基准计算的阳离子数及相关参数											
Si	5.46	5.42	5.45	5.46	5.47	5.71	5.68	5.61	5.59	5.71	5.67
Al ^{IV}	2.559	2.591	2.567	2.565	2.542	2.268	2.308	2.391	2.421	2.288	2.331
Al ^{VI}	0.655	0.696	0.653	0.604	0.565	0.891	0.933	0.782	0.779	0.842	0.852
Ti	0.30	0.31	0.31	0.32	0.30	0.30	0.33	0.33	0.34	0.32	0.32
Fe ³⁺	0.41	0.44	0.44	0.43	0.42	0.50	0.49	0.48	0.48	0.51	0.50
Fe ²⁺	3.16	3.14	3.17	3.25	3.28	2.54	2.47	2.68	2.79	2.64	2.66
Mn	0.09	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07
Mg	0.80	0.78	0.82	0.79	0.88	0.88	0.88	0.92	0.78	0.83	0.78
Ca	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Na	0.04	0.03	0.02	0.03	0.01	0.05	0.04	0.06	0.09	0.05	0.06
K	1.98	1.94	1.92	1.94	1.95	1.87	1.90	1.89	1.89	1.85	1.86
OH*	3.45	3.43	3.44	3.43	3.36	3.58	3.52	3.54	3.57	3.55	3.57
F	0.53	0.55	0.54	0.54	0.61	0.41	0.46	0.45	0.42	0.44	0.42
Cl	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Al ^T	3.21	3.29	3.22	3.17	3.11	3.16	3.24	3.17	3.20	3.13	3.18
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.13	0.14	0.14	0.13	0.13	0.20	0.20	0.18	0.17	0.19	0.19
Fe ³⁺ /Fe ³⁺ +Fe ²⁺	0.116	0.122	0.122	0.117	0.112	0.164	0.167	0.152	0.148	0.161	0.159
X _{Fe}	0.80	0.80	0.79	0.80	0.79	0.74	0.74	0.74	0.78	0.76	0.77
X _{Mg}	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21	0.26	0.26	0.26	0.22	0.24	0.23
IV(F)	1.33	1.30	1.32	1.31	1.27	1.53	1.47	1.48	1.47	1.48	1.48
IV(Cl)	-3.16	-3.06	-3.16	-3.25	-3.22	-3.12	-3.06	-3.15	-3.00	-3.00	-3.05
IV(F/Cl)	4.49	4.35	4.48	4.55	4.49	4.65	4.53	4.63	4.47	4.48	4.53
log(F/OH)	-0.82	-0.80	-0.81	-0.80	-0.74	-0.94	-0.88	-0.90	-0.93	-0.91	-0.93
log(Cl/OH)	-2.24	-2.34	-2.25	-2.14	-2.20	-2.39	-2.46	-2.36	-2.43	-2.47	-2.40
log(F/Cl)	1.42	1.54	1.44	1.34	1.46	1.45	1.58	1.46	1.49	1.56	1.47
log(H ₂ O/HF)	4.52	4.35	4.34	4.34	4.46	4.22	4.30	4.27	4.18	4.24	4.20
log(H ₂ O/HCl)	2.27	2.18	2.19	2.22	2.20	2.13	2.12	2.14	2.15	2.13	2.15
log(HF/HCl)	-0.76	-0.69	-0.66	-0.59	-0.68	-0.75	-0.81	-0.75	-0.70	-0.77	-0.71
t/°C	631	634	633	641	627	632	644	646	651	638	641

续表 1-1

Continued Table 1-1

组分	L2-20-1-1	L2-20-1-2	L2-20-1-3	L2-20-1-4	L2-20-1-5	L2-20-1-6	L2-20-1-7	L2-20-1-8	L2-20-2-1	L2-20-2-2
二长花岗岩										
SiO ₂	34.02	34.83	35.70	34.88	34.81	34.87	35.88	35.37	34.83	35.09
TiO ₂	2.715	2.619	2.61	2.636	2.489	2.463	2.455	2.49	3.1	2.549
Al ₂ O ₃	16.92	17.47	17.44	16.98	17.18	16.81	17.06	16.85	17.50	16.63
Fe ₂ O ₃	3.556	3.797	4.065	4.084	3.787	3.697	4.04	3.72	3.85	3.77
FeO	22.06	22.23	20.95	21.77	21.22	21.94	19.49	22.25	22.15	21.77
MnO	0.64	0.681	0.691	0.585	0.68	0.635	0.556	0.76	0.655	0.543
MgO	4.035	3.964	4.112	4.493	4.336	4.313	4.394	4.319	4.175	4.35
CaO	0.032	0.008	0.021	0.097	0.049	0.028	0.08	0.008	0.038	0.051
Na ₂ O	0.118	0.055	0.014	0.113	0.13	0.074	0.072	0.061	0.088	0.117
K ₂ O	9.521	9.608	9.516	8.579	9.323	9.533	9.353	9.731	9.539	9.476
WO ₃	0.029	0.032	-	0.041	0.131	0.129	-	0.003	0.191	0.170
H ₂ O ⁺	3.43	3.49	3.50	3.42	3.44	3.41	3.41	3.46	3.51	3.45
F	0.574	0.625	0.708	0.736	0.666	0.729	0.798	0.729	0.649	0.667
Cl	0.062	0.047	0.031	0.056	0.059	0.066	0.049	0.058	0.044	0.051
以 22 个氧原子为基准计算的阳离子数及相关参数										
Si	5.45	5.47	5.57	5.50	5.51	5.53	5.65	5.54	5.43	5.55
Al ^{IV}	2.549	2.527	2.433	2.496	2.488	2.474	2.346	2.458	2.570	2.447
Al ^{VI}	0.647	0.707	0.771	0.661	0.719	0.666	0.822	0.652	0.643	0.654
Ti	0.33	0.31	0.31	0.31	0.30	0.29	0.29	0.29	0.36	0.30
Fe ³⁺	0.43	0.45	0.48	0.48	0.45	0.44	0.48	0.44	0.45	0.45
Fe ²⁺	2.96	2.92	2.73	2.87	2.81	2.91	2.57	2.91	2.89	2.88
Mn	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.07	0.10	0.09	0.07
Mg	0.96	0.93	0.96	1.06	1.02	1.02	1.03	1.01	0.97	1.03
Ca	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Na	0.04	0.02	0.00	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
K	1.95	1.93	1.89	1.73	1.88	1.93	1.88	1.94	1.90	1.91
OH*	3.69	3.68	3.64	3.62	3.65	3.62	3.59	3.62	3.67	3.65
F	0.29	0.31	0.35	0.37	0.33	0.37	0.40	0.36	0.32	0.33
Cl	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
Al ^T	3.20	3.23	3.20	3.16	3.21	3.14	3.17	3.11	3.21	3.10
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.15	0.15	0.17	0.17	0.16	0.15	0.19	0.15	0.16	0.16
Fe ³⁺ /Fe ³⁺ +Fe ²⁺	0.127	0.133	0.149	0.144	0.138	0.132	0.157	0.131	0.135	0.135
X _{Fe}	0.75	0.76	0.74	0.73	0.73	0.74	0.71	0.74	0.75	0.74
X _{Mg}	0.25	0.24	0.26	0.27	0.27	0.26	0.29	0.26	0.25	0.26
IV(F)	1.67	1.63	1.61	1.59	1.63	1.58	1.58	1.59	1.63	1.63
IV(Cl)	-3.15	-3.01	-2.86	-3.15	-3.16	-3.20	-3.13	-3.14	-3.00	-3.09
IV(F/Cl)	4.81	4.64	4.47	4.74	4.80	4.79	4.71	4.72	4.63	4.73
log(F/OH)	-1.10	-1.07	-1.02	-0.99	-1.04	-0.99	-0.96	-1.00	-1.06	-1.04
log(Cl/OH)	-2.34	-2.47	-2.65	-2.38	-2.36	-2.31	-2.44	-2.37	-2.50	-2.43
log(F/Cl)	1.24	1.39	1.63	1.39	1.32	1.31	1.48	1.37	1.44	1.39
log(H ₂ O/HF)	4.21	4.26	4.34	4.36	4.35	4.39	4.46	4.38	4.20	4.33
log(H ₂ O/HCl)	2.21	2.21	2.17	2.20	2.22	2.23	2.19	2.22	2.16	2.20
log(HF/HCl)	-0.71	-0.81	-0.95	-0.85	-0.83	-0.82	-0.96	-0.85	-0.80	-0.85
t/°C	645	635	634	639	629	627	627	626	663	633

续表 1-2

Continued Table 1-2

组分	L2-20-2-3	L2-20-2-4	L2-20-2-5	L2-20-3-1	L2-20-3-2	L2-20-3-3	L2-20-3-4	L2-37-1-1	L2-37-1-2	L2-37-1-3
二长花岗岩					二云母花岗岩					
SiO ₂	34.49	35.04	35.17	35.01	35.23	35.23	34.96	35.30	35.24	35.44
TiO ₂	2.591	2.607	2.663	2.634	2.612	2.696	2.749	3.179	2.935	2.899
Al ₂ O ₃	16.37	16.87	17.71	16.90	16.97	17.54	17.63	16.58	17.01	16.95
Fe ₂ O ₃	3.67	3.60	3.88	3.61	3.82	4.00	3.82	3.27	3.30	3.38
FeO	22.20	23.06	21.54	22.75	21.91	20.98	21.76	19.63	19.74	19.16
MnO	0.443	0.688	0.647	0.667	0.614	0.565	0.581	0.754	0.743	0.659
MgO	4.354	4.499	4.047	4.327	4.399	4.484	4.452	7.285	6.844	6.953
CaO	0.07	0.031	0.007	0	0.016	0.089	0.013	0.000	0.002	0.000
Na ₂ O	0.093	0.081	0.049	0.025	0.08	0.08	0.058	0.054	0.035	0.075
K ₂ O	9.323	9.604	9.721	9.822	9.502	9.195	9.54	9.797	9.878	9.771
WO ₃	-	0.266	0.146	0.133	-	0.157	-	0.013	0.016	-
H ₂ O ⁺	3.41	3.47	3.56	3.37	3.38	3.46	3.47	3.22	3.32	3.26
F	0.646	0.711	0.553	0.892	0.884	0.754	0.729	1.378	1.160	1.285
Cl	0.046	0.074	0.046	0.071	0.052	0.037	0.051	0.053	0.033	0.044
以 22 个氧原子为基准计算的阳离子数及相关参数										
Si	5.52	5.48	5.49	5.49	5.53	5.51	5.46	5.45	5.45	5.48
Al ^{IV}	2.481	2.520	2.507	2.509	2.474	2.494	2.545	2.553	2.554	2.519
Al ^{VI}	0.606	0.588	0.753	0.615	0.663	0.737	0.697	0.462	0.544	0.570
Ti	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.37	0.34	0.34
Fe ³⁺	0.44	0.42	0.46	0.43	0.45	0.47	0.45	0.38	0.38	0.39
Fe ²⁺	2.97	3.02	2.81	2.98	2.87	2.74	2.84	2.53	2.55	2.48
Mn	0.06	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.08	0.10	0.10	0.09
Mg	1.04	1.05	0.94	1.01	1.03	1.04	1.03	1.67	1.58	1.60
Ca	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
K	1.90	1.92	1.94	1.96	1.90	1.83	1.90	1.93	1.95	1.93
OH*	3.66	3.63	3.71	3.54	3.55	3.62	3.63	3.31	3.42	3.36
F	0.33	0.35	0.27	0.44	0.44	0.37	0.36	0.67	0.57	0.63
Cl	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ^T	3.09	3.11	3.26	3.12	3.14	3.23	3.24	3.02	3.10	3.09
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.15	0.14	0.16	0.14	0.16	0.17	0.16	0.15	0.15	0.16
Fe ³⁺ /Fe ³⁺ +Fe ²⁺	0.130	0.123	0.139	0.125	0.136	0.147	0.136	0.130	0.131	0.137
X _{Fe}	0.74	0.74	0.75	0.75	0.74	0.72	0.73	0.60	0.62	0.61
X _{Mg}	0.26	0.26	0.25	0.25	0.26	0.28	0.27	0.40	0.38	0.39
IV(F)	1.64	1.60	1.70	1.48	1.50	1.59	1.59	1.46	1.52	1.49
IV(Cl)	-3.04	-3.24	-3.01	-3.23	-3.11	-2.98	-3.10	-3.40	-3.15	-3.30
IV(F/Cl)	4.68	4.84	4.72	4.71	4.61	4.57	4.69	4.86	4.67	4.79
log(F/OH)	-1.05	-1.01	-1.13	-0.90	-0.91	-0.99	-1.00	-0.69	-0.78	-0.73
log(Cl/OH)	-2.47	-2.27	-2.48	-2.27	-2.41	-2.57	-2.43	-2.38	-2.60	-2.46
log(F/Cl)	1.42	1.25	1.35	1.37	1.50	1.58	1.43	1.69	1.82	1.74
log(H ₂ O/HF)	4.30	4.34	4.22	4.45	4.46	4.37	4.33	4.83	4.69	4.80
log(H ₂ O/HCl)	2.19	2.23	2.19	2.23	2.20	2.16	2.19	2.08	2.07	2.08
log(HF/HCl)	-0.85	-0.77	-0.80	-0.82	-0.91	-0.95	-0.86	-1.13	-1.18	-1.17
t/°C	638	634	637	636	635	641	644	677	663	662

续表 1-3

Continued Table 1-3

组分	L2-37-1-4	L2-37-2-1	L2-37-2-2	L2-37-2-3	L2-37-2-4	L2-37-2-5	L2-37-3-1	L2-37-3-2	L2-37-3-3	L2-37-3-4
二云母花岗岩										
SiO ₂	35.69	35.35	34.97	35.07	35.62	35.52	35.06	35.29	35.02	35.45
TiO ₂	2.840	2.879	2.896	2.896	3.092	3.047	3.028	2.677	3.109	3.131
Al ₂ O ₃	16.77	16.80	17.32	17.05	17.70	17.29	17.11	17.04	16.80	17.43
Fe ₂ O ₃	3.30	3.48	3.29	3.21	3.43	3.21	3.32	3.45	3.44	3.47
FeO	19.68	19.12	19.30	20.41	18.36	19.95	19.45	17.83	18.83	18.88
MnO	0.700	0.794	0.643	0.640	0.550	0.676	0.629	0.600	0.773	0.688
MgO	7.042	6.783	6.845	6.890	6.790	6.894	6.808	6.893	6.443	6.764
CaO	0.000	0.000	0.007	0.003	0.000	0.039	0.014	0.000	0.003	0.019
Na ₂ O	0.102	0.054	0.060	0.072	0.101	0.225	0.083	0.024	0.044	0.066
K ₂ O	9.891	9.552	9.818	9.806	10.085	9.962	9.806	9.672	9.778	9.855
WO ₃	0.076	-	0.085	0.081	0.018	-	0.109	-	0.118	0.153
H ₂ O ⁺	3.29	3.26	3.26	3.238	3.252	3.321	3.246	3.149	3.284	3.300
F	1.272	1.239	1.235	1.333	1.379	1.252	1.281	1.408	1.119	1.251
Cl	0.043	0.029	0.052	0.032	0.030	0.045	0.038	0.039	0.037	0.031
以 22 个氧原子为基准计算的阳离子数及相关参数										
Si	5.49	5.49	5.42	5.42	5.46	5.43	5.43	5.53	5.48	5.45
Al ^{IV}	2.509	2.506	2.576	2.584	2.540	2.571	2.566	2.474	2.519	2.553
Al ^{VI}	0.531	0.570	0.589	0.519	0.657	0.543	0.558	0.671	0.579	0.603
Ti	0.33	0.34	0.34	0.34	0.36	0.35	0.35	0.32	0.37	0.36
Fe ³⁺	0.38	0.41	0.38	0.37	0.40	0.37	0.39	0.41	0.40	0.40
Fe ²⁺	2.53	2.48	2.50	2.64	2.35	2.55	2.52	2.33	2.46	2.43
Mn	0.09	0.10	0.08	0.08	0.07	0.09	0.08	0.08	0.10	0.09
Mg	1.61	1.57	1.58	1.59	1.55	1.57	1.57	1.61	1.50	1.55
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.07	0.02	0.01	0.01	0.02
K	1.94	1.89	1.94	1.93	1.97	1.94	1.94	1.93	1.95	1.93
OH*	3.37	3.38	3.38	3.34	3.32	3.38	3.36	3.29	3.44	3.38
F	0.62	0.61	0.61	0.65	0.67	0.60	0.63	0.70	0.55	0.61
Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ^T	3.04	3.08	3.17	3.10	3.20	3.11	3.12	3.14	3.10	3.16
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.15	0.16	0.15	0.14	0.17	0.14	0.15	0.17	0.16	0.17
Fe ³⁺ /Fe ³⁺ +Fe ²⁺	0.131	0.141	0.133	0.124	0.144	0.127	0.133	0.148	0.141	0.142
X _{Fe}	0.61	0.61	0.61	0.62	0.60	0.62	0.62	0.59	0.62	0.61
X _{Mg}	0.39	0.39	0.39	0.376	0.397	0.381	0.384	0.408	0.379	0.390
IV (F)	1.49	1.50	1.49	1.44	1.46	1.49	1.47	1.45	1.53	1.50
IV (Cl)	-3.28	-3.11	-3.37	-3.13	-3.15	-3.28	-3.22	-3.30	-3.20	-3.14
IV (F/Cl)	4.78	4.61	4.86	4.58	4.60	4.77	4.70	4.74	4.73	4.64
log(F/OH)	-0.74	-0.74	-0.75	-0.71	-0.70	-0.75	-0.73	-0.67	-0.79	-0.75
log(Cl/OH)	-2.48	-2.65	-2.39	-2.60	-2.63	-2.46	-2.53	-2.50	-2.54	-2.62
log(F/Cl)	1.74	1.90	1.65	1.89	1.93	1.72	1.80	1.83	1.75	1.88
log(H ₂ O/HF)	4.79	4.77	4.76	4.82	4.84	4.74	4.77	4.96	4.64	4.73
log(H ₂ O/HCl)	2.09	2.06	2.10	2.08	2.05	2.09	2.07	2.08	2.07	2.05
log(HF/HCl)	-1.18	-1.21	-1.13	-1.19	-1.22	-1.13	-1.16	-1.25	-1.13	-1.19
t/°C	658	661	662	660	672	667	669	654	674	673

续表 1-4

Continued Table 1-4

组分	L2-40-2-1	L2-40-2-2	L2-40-2-3	L2-40-2-4	L2-40-2-5	L2-40-2-6	L2-40-2-7	L2-40-2-8	L2-40-2-9	L2-40-2-10
钾长花岗岩										
SiO ₂	34.50	34.90	34.98	34.47	34.81	34.49	34.53	34.63	34.84	34.52
TiO ₂	2.500	2.677	2.679	2.637	2.698	2.228	2.454	2.598	2.541	2.509
Al ₂ O ₃	17.48	17.42	17.10	17.38	17.15	17.36	17.57	17.45	17.31	17.47
Fe ₂ O ₃	3.53	3.69	3.71	3.58	3.45	3.44	3.53	3.38	3.48	3.45
FeO	24.43	23.79	24.30	24.03	24.24	23.64	24.45	24.93	24.28	24.88
MnO	0.684	0.623	0.579	0.565	0.626	0.606	0.609	0.692	0.578	0.585
MgO	3.579	3.804	3.722	3.774	3.859	3.899	3.602	3.891	3.906	3.697
CaO	0.000	0.000	0.000	0.026	0.036	0.083	0.009	0.000	0.001	0.000
Na ₂ O	0.043	0.039	0.029	0.106	0.158	0.069	0.037	0.063	0.045	0.045
K ₂ O	9.745	9.770	9.710	9.589	9.835	9.714	9.765	9.822	9.906	9.767
WO ₃	0.066	-	0.061	0.018	-	0.054	0.067	-	0.073	0.115
H ₂ O ⁺	3.557	3.529	3.516	3.537	3.467	3.437	3.487	3.522	3.499	3.514
F	0.506	0.621	0.644	0.540	0.671	0.707	0.658	0.645	0.678	0.621
Cl	0.034	0.044	0.041	0.031	0.176	0.037	0.047	0.050	0.046	0.041
以22个氧原子为基准计算的阳离子数及相关参数										
Si	5.41	5.44	5.46	5.41	5.44	5.45	5.41	5.39	5.44	5.40
Al ^{IV}	2.588	2.560	2.541	2.587	2.564	2.554	2.588	2.611	2.564	2.602
Al ^{VI}	0.644	0.640	0.603	0.628	0.592	0.675	0.656	0.589	0.619	0.618
Ti	0.29	0.31	0.31	0.31	0.32	0.26	0.29	0.30	0.30	0.29
Fe ³⁺	0.42	0.43	0.44	0.42	0.40	0.41	0.42	0.40	0.41	0.41
Fe ²⁺	3.20	3.10	3.17	3.16	3.16	3.12	3.20	3.24	3.17	3.25
Mn	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08
Mg	0.84	0.88	0.87	0.88	0.90	0.92	0.84	0.90	0.91	0.86
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
K	1.95	1.94	1.93	1.92	1.96	1.96	1.95	1.95	1.97	1.95
OH [*]	3.74	3.68	3.67	3.72	3.62	3.64	3.66	3.67	3.65	3.68
F	0.25	0.31	0.32	0.27	0.33	0.35	0.33	0.32	0.34	0.31
Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ^T	3.25	3.21	3.15	3.23	3.17	3.24	3.26	3.21	3.19	3.23
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.13	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12
Fe ³⁺ /Fe ³⁺ +Fe ²⁺	0.115	0.123	0.121	0.118	0.113	0.116	0.115	0.109	0.114	0.111
X _{Fe}	0.79	0.78	0.79	0.78	0.78	0.77	0.79	0.78	0.78	0.79
X _{Mg}	0.207	0.222	0.214	0.219	0.221	0.227	0.208	0.218	0.223	0.209
IV(F)	1.69	1.60	1.62	1.59	1.67	1.58	1.55	1.56	1.59	1.58
IV(Cl)	-2.79	-2.89	-2.94	-2.90	-2.78	-3.55	-2.89	-2.95	-2.99	-2.96
IV(F/Cl)	4.48	4.48	4.55	4.49	4.45	5.12	4.44	4.51	4.58	4.54
log(F/OH)	-1.17	-1.08	-1.06	-1.14	-1.04	-1.01	-1.05	-1.06	-1.04	-1.08
log(Cl/OH)	-2.61	-2.50	-2.53	-2.65	-1.89	-2.56	-2.47	-2.44	-2.48	-2.53
log(F/Cl)	1.44	1.42	1.47	1.51	0.85	1.55	1.42	1.38	1.44	1.45
log(/H ₂ O)/HF)	4.18	4.23	4.24	4.18	4.26	4.40	4.29	4.26	4.30	4.25
log(/H ₂ O)/HCl)	2.22	2.21	2.21	2.19	2.34	2.24	2.24	2.23	2.22	2.23
log(/HF)/HCl)	-0.80	-0.79	-0.80	-0.83	-0.32	-0.92	-0.79	-0.77	-0.82	-0.80
t/°C	625	637	637	635	638	606	622	631	628	625

注: FeO^T为电子探针测试FeO质量百分数, 氧化系数=Fe³⁺/(Fe³⁺+Fe²⁺), 含铁系数=(Fe³⁺+Fe²⁺)/(Fe³⁺+Fe²⁺+Mg); X_{Fe}=Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg²⁺); X_{Mg}=Mg/(Fe²⁺+Mg²⁺); H₂O*代表基于分子式计算的水含量; -表示低于检测线; WO₃未参与离子数计算。

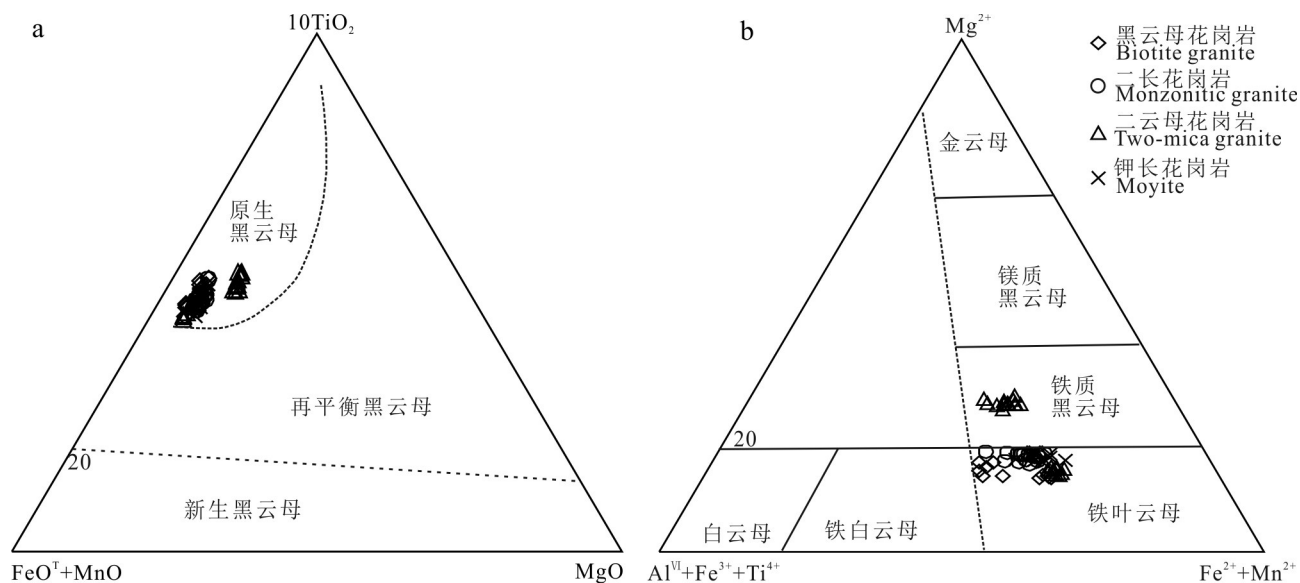


图4 巴斯铁列克钨多金属矿区花岗质岩石黑云母成分图解

a. 10TiO_2 -($\text{FeO}+\text{MnO}$)- MgO 三角图 (据 Nachit et al., 2005); b. 黑云母 Mg^{2+} -($\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Fe}^{3+}+\text{Ti}^{4+}$)-($\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}^{2+}$) 分类图 (据 Foster, 1960)

Fig. 4 Chemical compositional diagram of biotite from granitoids in the Bastielieke tungsten polymetallic deposit

a. 10TiO_2 -($\text{FeO}+\text{MnO}$)- MgO diagram of biotite (after Nachit et al., 2005); b. Mg -($\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Fe}^{3+}+\text{Ti}$)-($\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}$) diagram of biotite classification (after Foster, 1960)

4.1 结晶温度

Henry 等(2005)研究结果表明,低-中压条件下变泥质岩中黑云母的Ti含量、 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 比值与其结晶温度存在相关性,并构造一经验公式估算黑云母的结晶温度。越来越多的研究成果表明,该公式也可以扩展用于估算花岗岩中黑云母的结晶温度(Sarjoughian, et al., 2015; 陶继华等, 2015; 郭耀宇等, 2015; 唐攀等, 2017; Azadbakht et al., 2020; 季根源等, 2021)。本文利用黑云母Ti温度经验公式(Henry et al., 2005): $t = \{[\ln(\text{Ti}) + 2.3594 + 1.7283 \times (X_{\text{Mg}})^3]/4.6482 \times 10^{-9}\}^{0.333}$, (其中 $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$; Ti为根据22个氧原子计算的离子数),获得巴斯铁列克矿区二云母花岗岩中黑云母结晶温度最高,为654~677°C、黑云母花岗岩为627~651°C、二长花岗岩为629~664°C、钾长花岗岩为622~655°C(表1)。在 $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ -Ti图解上(图5a),所有黑云母位于600~700°C范围内,与利用公式计算的结果相近。

4.2 岩浆挥发分

黑云母除了含有一定的 H_2O 之外,F和Cl也常替代OH进入其晶格(Munoz, 1984)。由于F离子半径(1.31 Å)较Cl离子半径(1.81 Å)更接近OH离子半径(1.38 Å)(Munoz, 1984),F较Cl更易替代OH

使黑云母常显富F贫Cl。因此,即使黑云母中Cl含量低,与其相关的熔体或热液中也可能有较高的Cl含量(唐攀等, 2017)。研究表明,由于“Fe-F规避”和“Mg-Cl规避”的晶体化学效应(Munoz, 1984; 张振等, 2019),黑云母中F和Cl替代OH的程度受 Mg/Fe

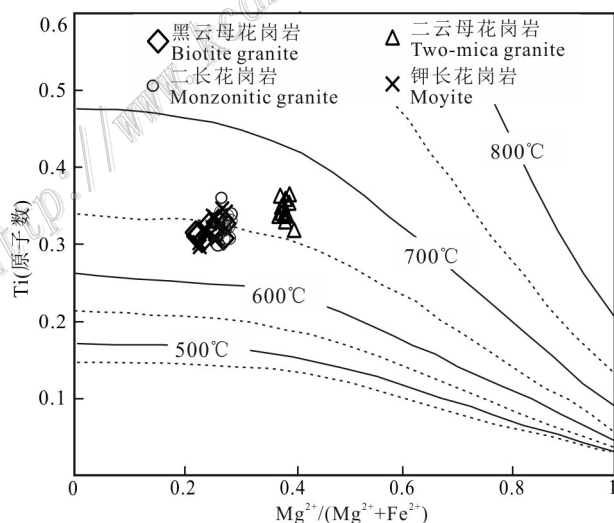


图5 黑云母的 $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ -Ti 温度图 (底图据 Henry et al., 2005)

Fig. 5 $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ -Ti diagram of biotite (base map after Henry et al., 2005)

比值影响,高Mg/Fe比值有利于F替代,低Mg/Fe比值有利于Cl替代(Munoz, 1984)。为了消除Fe和Mg对F和Cl的影响,利用Munoz(1984)提出的公式计算了F和Cl在黑云母中的相对富集程度,分别用 $IV(F)$ 、 $IV(Cl)$ 、 $IV(F/Cl)$ 表示, $IV(F)$ 和 $IV(Cl)$ 值越小表明富集程度越高, $IV(F/Cl)$ 值不受平衡体系温度和OH含量影响,数值越低F/Cl越大。二云母花岗岩中黑云母的 $IV(F)$ 值(1.44~1.50)和 $IV(F/Cl)$ (4.58~4.86)最高, $IV(Cl)$ 值(-3.40~-3.11)最低;黑云母花岗岩中黑云母的 $IV(F)$ (1.27~1.53)、 $IV(Cl)$ (-3.25~-3.00)和 $IV(F/Cl)$ (4.35~4.63)值分别低于二长花岗岩中黑云母的相应值1.48~1.70,-3.20~-2.86和4.57~4.84(表1、图6a);钾长花岗岩中黑云母的 IV

(Cl)值(-2.79~-2.99)最高, $IV(F)$ (1.35~1.69)和 $IV(F/Cl)$ (4.44~4.58)介于黑云母花岗岩和二长花岗岩相应值之间(表1)。黑云母花岗岩和二长花岗岩的 $IV(F)$ 与 $IV(F/Cl)$ 呈现明显的正相关(图6b),暗示了它们的演化关系(Zhang et al., 2016)。

黑云母的F和Cl含量也可以用来估算共存热液流体中F和Cl的富集程度(Speer, 1984; Zhu et al., 1992; Munoz, 1992)。根据Munoz(1992)提出的公式计算,获得了与黑云母平衡熔体的F和Cl的逸度 $\log(fH_2O/fHF)$ 和 $\log(fH_2O/fHCl)$ (表1)。所有黑云母的 $\log(fHF/fHCl)$ 值均为负值。二云母花岗岩与其他类型岩石有明显不同的卤素逸度特征,具有最低的 $\log(fH_2O/fHCl)$ (2.05~2.10)和 $\log(fHF/fHCl)$

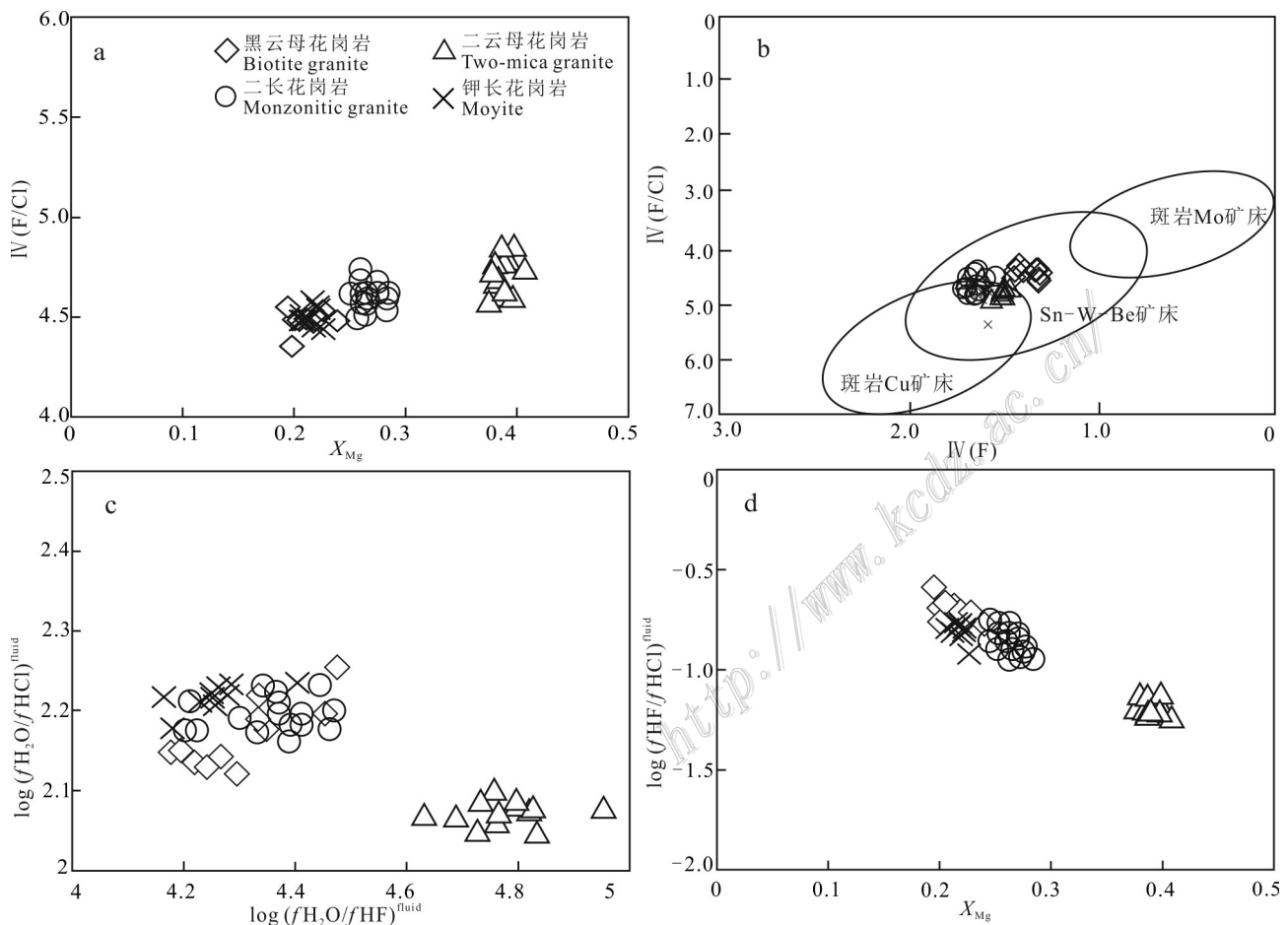


图6 巴斯铁列克矿区花岗岩中黑云母与共存流体关系图解

a. X_{Mg} - $IV(F/Cl)$; b. $IV(F)$ - $IV(F/Cl)$; c. $\log(fH_2O/fHCl)_{fluid}$ - $\log(fH_2O/fHF)_{fluid}$; d. X_{Mg} - $\log(fHF/fHCl)_{fluid}$ (卤素逸度比值采用Munoz, 1992计算)

Fig. 6 Estimated condition of hydrothermal fluids in equilibrium with magmatic biotite grains from the Bastielliektungsten polymetallic deposit

a. X_{Mg} versus $IV(F/Cl)$; b. $IV(F)$ versus $IV(F/Cl)$; c. $\log(fH_2O/fHCl)_{fluid}$ versus $\log(fH_2O/fHF)_{fluid}$; d. X_{Mg} versus $\log(fHF/fHCl)_{fluid}$ (The fluorine-chlorine fugacity ratios from Munoz, 1992)

值(-1.25~-1.13),最高的 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ (4.73~4.96);黑云母花岗岩有最高的 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$ (2.18~2.29)和 $\log(f\text{HF}/f\text{HCl})$ 值(-0.59~-0.81),最低的 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ (4.33~4.68);二长花岗岩的 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ (4.21~4.46)较钾长花岗岩偏高(4.18~4.40),但二者有相近的 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$ (分别为2.16~2.23和2.19~2.34)(表1、图6c、d)。

综上,巴斯铁列克矿区花岗质岩浆挥发分组成明显不同,其中二云母花岗岩更富氟,黑云母花岗岩更富氟,钾长花岗岩与二长花岗岩有相近的F富集程度。

5 讨论

5.1 岩石成因

前人研究结果表明,黑云母的成分对判别寄主岩石类型、示踪岩浆分异演化以及岩浆混合等具有很好的指示作用(Van Middelaar et al., 1990; 赵沔等, 2015)。一般来说,S型花岗岩中黑云母相对富铝,I型花岗岩中的黑云母相对富镁,A型和分异I型花岗岩中的黑云母明显富铁(Ague et al., 1988; Abdel-Rahman, 1994)。前已述及,巴斯铁列克矿区花岗岩中黑云母具有高铁、富铝、贫镁特征,在黑云母的 $\text{FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 图解上(图7a)位于过铝质岩区,与黑云母共存流体具有负 $\log(f\text{HCl}/f\text{HF})$ 值和正 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ 值,也显示过铝质花岗岩特征(Rasmussen et al., 2013)(图6、表1)。然而大部分黑云母的 Al^{VI} 值(0.47~0.91)远高于S型花岗岩中黑云母的 Al^{VI} 值(0.353~0.561)(Abdel-Rahman, 1994; 徐克勤等, 1986),所有黑云母在 $\Sigma\text{Al-Mg}^{2+}$ 关系图解上(图7b)位于钙碱性岩区,黑云母的氧化系数($\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$)(0.119~0.167)与I型花岗岩中黑云母相应值接近(0.121~0.252)(Abdel-Rahman, 1994),而且在黑云母 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}+\text{Mg}^{2+})$ 图解中(图7c)位于A型和I型花岗岩区,在 $\text{Al}^{\text{IV}}-\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 图解中(图7d)位于A型花岗岩区。大量研究结果表明,I型花岗质岩浆经过斜长石、普通角闪石和黑云母的分异结晶,可以演化为弱过铝质-强过铝质岩石(Zen et al., 1986),出现石榴子石与白云母的富铝矿物组合(Chappell, 1999; 吴福元等, 2017),并且黑云母富Fe(Ague et al., 1988)。二叠纪时期新疆阿尔泰造山带南缘处于后碰撞伸展环境(王涛等, 2005; 童英等, 2010; 李强等, 2019; Zhang et al., 2021),巴斯铁列克

矿区花岗岩有白云母+黑云母+石榴子石等过铝质矿物组合。因此,黑云母成分指示巴斯铁列克矿区花岗岩不是S型花岗岩,更可能是I型花岗岩兼具A型花岗岩特征。这与全岩成分研究结果一致(包长甲等, 2021)。

巴斯铁列克矿区花岗质岩体同一类型岩石中黑云母的 $w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{K}_2\text{O})$ 变化很小(表1),长石也未见反环带构造,表明岩浆演化过程中处于相对封闭环境,没有外来岩浆的注入和混合,黑云母成分可以反映岩浆结晶分异过程。前已述及,二云母花岗岩较其他类型岩石中的黑云母有高 $w(\text{MgO})$ 、低 $w(\text{FeO})$ 和 Al^{VI} (表1、图5),不同于其他类型岩石的挥发分组成(图6);并且其中黑云母结晶温度高,与黑云母平衡的熔/流体 $\log(f\text{HF}/f\text{HCl})$ 低 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ 高(图6c、d),暗示母岩浆有更高的幔源物质参与,这与其有正的高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+3.3~+3.8)(Zhang et al., 2022)结果一致,同时表明岩浆演化程度低。黑云母花岗岩((284.2±1.1)Ma)与二长花岗岩((284.7±1.2)Ma)有相近的锆石U-Pb年龄(包长甲等, 2021),其中黑云母的 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ 与 $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$ 之间、 X_{Mg} 与 $\log(f\text{HF}/f\text{HCl})$ 和 $\log(\text{F}/\text{OH})$ 之间呈良好的线性关系(图6),表明是同一岩浆房不同演化程度的产物,挥发分主要由结晶分异控制(Azadbakht et al., 2020)。黑云母花岗岩较二长花岗岩有低 $w(\text{MgO})$ 高、低 $w(\text{FeO})$ 和高 Al^{VI} ,表明黑云母花岗岩较二长花岗岩演化程度高,因为有研究成果表明,岩浆在分异演化过程中,岩浆的 $w(\text{MgO})$ 逐渐降低, $w(\text{FeO})$ 逐渐增加(Webster et al., 1990; 季根源等, 2021)。黑云母花岗岩中黑云母有最低的IV(F)和最高的IV(F/Cl)(表1、图6b),与之平衡熔/流体的 $\log(f\text{HF}/f\text{HCl})$ 最高, $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$ 最低(图6c、d),也表明其演化程度高(Rasmussen et al., 2013)。钾长花岗岩中黑云母的 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{FeO})$ 与黑云母花岗岩相当, Al^{VI} 明显偏低(表1、图5),与其平衡熔/流体的F和Cl富集程度与二长花岗岩相当(图6d),表明岩浆演化程度较黑云母花岗岩低,与黑云母花岗岩和二长花岗岩无相关性。此外,在巴斯铁列克矿区岩体中,尽管分析的黑云母中W与F含量不均匀(表1),但黑云母花岗岩中黑云母的W和F含量明显高于二长花岗岩中的W与F含量,表明岩浆分异演化对钨和氟元素有明显富集作用,黑云母是钨和氟元素的主要载体,这与前人提出的钨在分异演化熔体中以类质同象方式进入黑云母晶格

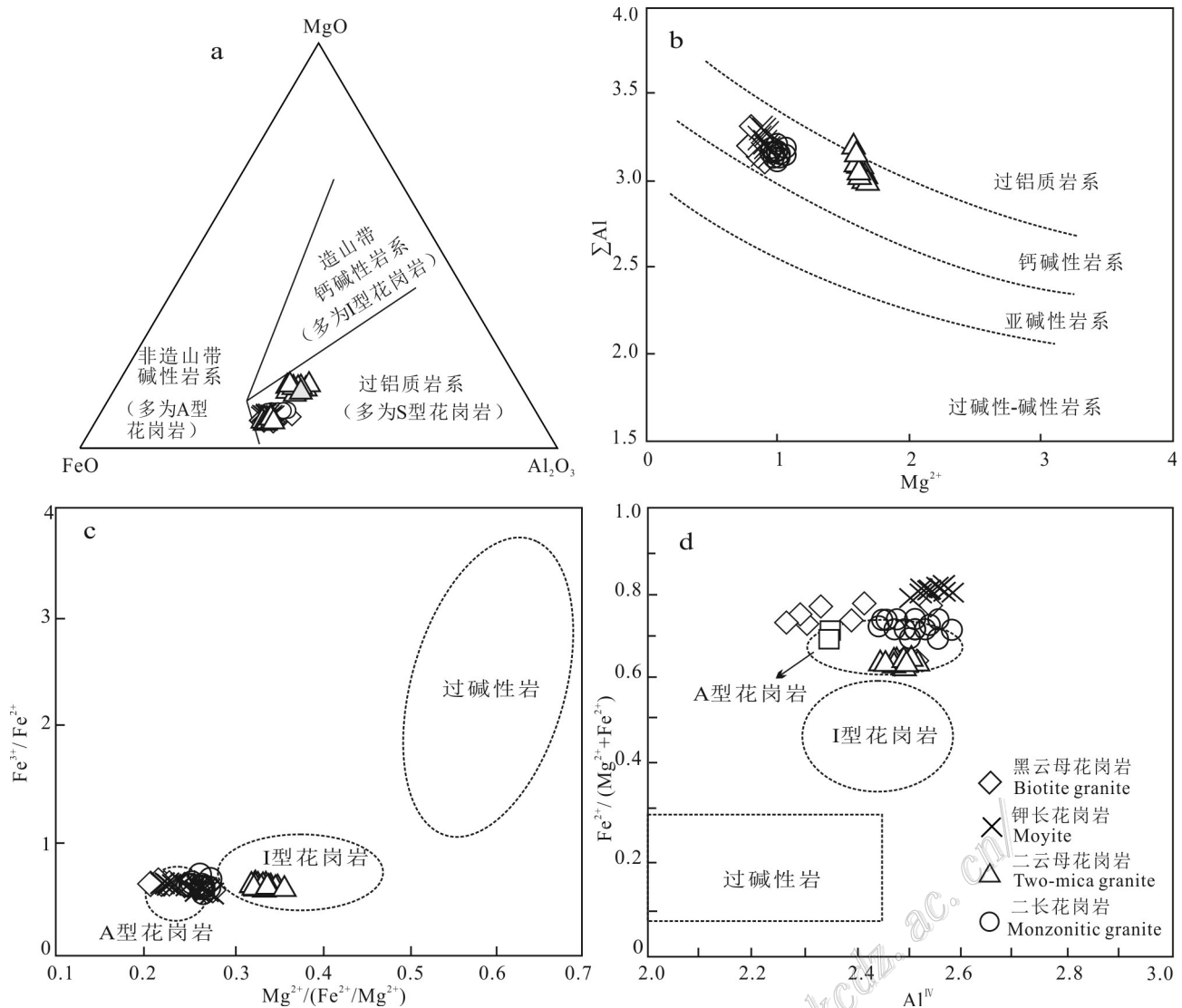


图7 巴斯铁列克矿区花岗岩中黑云母成分图解

a. MgO-FeO-Al₂O₃图解 (底图据 Abdel-Rahman, 1994); b. $\Sigma\text{Al}-\text{Mg}^{2+}$ 图解(底图据 Stussi et al., 1996); c. $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$ 图解 (底图据 Jiang et al., 2002); d. $\text{Al}^{\text{IV}}-\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 图解(底图据 Abdel-Rahman, 1994)

Fig. 7 Compositional diagrams of biotite from granitoids in the Bastielicke tungsten polymetallic deposit

a. Ternary diagram of MgO-FeO-Al₂O₃ (after Abdel-Rahman, 1994); b. $\Sigma\text{Al}-\text{Mg}^{2+}$ diagram (after Stussi et al., 1996); c. $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$ diagram (base map after Jiang et al., 2002); d. $\text{Al}^{\text{IV}}-\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ diagram (modified from Abdel-Rahman, 1994)

的认识一致(Adam et al., 2006; Fulmer et al., 2010; Yuan et al., 2019)。

总之,巴斯铁列克矿区花岗岩中黑云母寄主岩石为I型花岗岩并具有A型花岗岩特征;黑云母花岗岩与二长花岗岩是同源岩浆不同演化程度的产物,黑云母花岗岩演化程度高;二云母花岗岩、钾长花岗岩分属不同的岩浆体系,二云母花岗岩可能有更多幔源物质参与,钾长花岗岩演化程度偏低。同时说明黑云母成分可以很好的反映花岗岩成因类型与岩

浆分异程度,并且在岩浆演化过程中不断富集W和F元素。

5.2 对成矿的指示

前已述及,巴斯铁列克矿床与花岗质岩浆热液作用密切相关。岩浆演化过程中的温度、压力、挥发分以及氧逸度等影响着岩浆热液的形成和成矿金属元素的运移和富集(Keppler et al., 1991; Webster et al., 2009)。巴斯铁列克矿区花岗岩主要为红褐色-褐色富铁云母-铁叶云母、An含量极低的斜长石以及

锰铝榴石-铁铝榴石组合,与钨锡钼成矿有关花岗岩的矿物组合一致(Rasmussen et al., 2013; 郭娜欣等, 2014; Azadbakht et al., 2020)。前人提出花岗质岩石中黑云母的含铁指数($X_{Fe} = Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg^{2+})$)与成矿的元素类型关系密切,与W和Sn矿化相关岩体的含铁指数相对较高,与Cu、Au和Mo矿化相关岩体的含铁指数偏低(周作侠, 1988; Azadbakht et al., 2020)。巴斯铁列克矿区黑云母花岗岩、二长花岗岩和钾长花岗岩中黑云母的含铁指数(0.71~0.80)在W和Sn矿化相关的高分异岩体(0.77±0.16)范围内,二云母花岗岩的含铁指数(0.59~0.61)在与Cu-Mo矿化相关岩体(0.56±0.12)范围内(Azadbakht et al., 2020)。因此,黑云母成分指示这些岩体可能有不同的成矿金属元素亲缘性,即二云母花岗岩可能与铜矿化有关,黑云母花岗岩、二长花岗岩和钾长花岗岩可能与钨矿化有关。

花岗质岩浆中挥发分组成与含量对成矿金属元素的迁移富集有重要影响(Rasmussen et al., 2013; Zhang et al., 2016; 张振等, 2019; Fan et al., 2019; 郑瑜林等, 2022)。尽管对于钨、铜和金在岩浆热液中迁移是以氯和氟的络合物形式还是氯和氟与金属元素直接结合的形式存在争议(Keppler et al., 1991; Wood et al., 2000);岩浆挥发分增加金属元素的溶解度(Wood et al., 2000; Che et al., 2013; 喻晓等, 2015)还是挥发分降低熔体黏度、密度和固相线温度有助于富集(Webster et al., 1987)也存在不一致的观点,甚至有学者认为钨矿床的形成与氯和氟的存在无关(Keppler et al., 1991; Zhang et al., 2016)。事实上,目前大量与钨锡矿化有关岩体富氟(Wood et al., 2000; Scaillet et al., 2004; Che et al., 2013; Zhang et al., 2016; Sun et al., 2018; 张振等, 2019),与铜金矿化有关岩体富氯(Munoz, 1984; Coulson et al., 2001; 张振等, 2019; 郑瑜林等, 2022)。巴斯铁列克矿区花岗岩出现原生黑云母、白云母、富F磷灰石,黑云母中F和Cl含量高,矿区内萤石发育,流体包裹体中富Cl(Yang et al., 2021),所有岩体中与黑云母平衡熔/流体的 $\log(fHF/fHCl)<0$,表明母岩浆是富F和Cl的含水岩浆,寄主岩浆中HCl较HF逸度高。前已述及,这些岩体属于不同的岩浆热液系统,二云母花岗岩有相对高的温度,Cl含量高,有利于Cu在岩浆熔体和热液流体中的运移,很可能与矿区Cu矿化有关;黑云母花岗岩、二长花岗岩和钾长花岗岩相对富集F,黑云母花岗岩演化程度高,可能反映黑云母花岗

岩与W矿化有关,因为W在岩浆演化晚期富集,W更容易由熔体进入热液流体(Bali et al., 2012)。在IV(F)-IV(F/Cl)上(图6b),黑云母花岗岩位于Sn-W-Be矿床区域,二云母花岗岩位于斑岩型Cu矿床与Sn-W-Be矿床重叠区域范围,也指示了二云母花岗岩与Cu矿化有关,黑云母花岗岩与W矿化有关。

巴斯铁列克矿区所有花岗岩中与黑云母平衡流体的逸度特征($\log(fH_2O/fHF)>4$, $\log(fHF/fHCl)<0$)与加拿大坎顿(Cantung)钨铜矿区(Rasmussen et al., 2013)和加拿大Sisson Brook钨铜矿区(Zhang et al., 2016)岩体中黑云母特征一致。然而,需要注意的是,所有岩体黑云母的Cl/F比值与OH/F比值变化不大(表1),缺乏HCl/HF比值与H₂O/HF比值明显偏高的样品,这被解释为黑云母结晶时岩浆热液尚未与熔体分离(出溶),即黑云母不是从岩浆-流体过渡体系直接结晶的,因为在岩浆演化或流体出溶过程中F保留在熔体相,Cl强烈进入流体相(Coulson et al., 2001),岩浆发生流体出溶后的残余岩浆有低的Cl/F比值和OH/F比值(Webster et al., 1990; Rasmussen et al., 2013; Zhang et al., 2016)。这恰好与全岩Nb/Ta>5指示的岩体尚未发生流体出溶的特征一致(包长甲等, 2021),Nb/Ta=5被认为是岩浆流体出溶和岩浆-流体过渡体系的指标(Ballouard et al., 2016)。如果这种情况是真的,目前研究的这些岩体应该不是巴斯铁列克钨多金属矿化的直接岩体。

综上所述,巴斯铁列克矿区出露的花岗岩来自不同的岩浆体系,二云母花岗质岩浆属高Cl体系;黑云母花岗质岩浆属高F、高分异岩浆体系,有利于W矿化;二长花岗岩和钾长花岗岩不是成矿母岩。

6 结 论

通过对巴斯铁列克钨多金属矿区花岗质岩石黑云母成分研究,得出如下结论:

(1) 巴斯铁列克钨多金属矿区花岗岩中原生黑云母具有富铁、高铝、贫镁低钛富F的特征,且不同类型岩石中黑云母有不同的挥发分组成,寄主岩石属I型花岗岩并兼具A型花岗岩特点。

(2) 矿区花岗质岩体母岩浆属富F和Cl的含水岩浆;岩浆源区和分异演化程度是导致花岗岩中黑云母成分差异的重要因素;黑云母花岗岩与二长花岗岩是同一岩浆房不同演化阶段的产物,岩浆结晶分异对钨和氟有明显的富集作用。

(3) 矿区花岗岩属于不同的岩浆热液体系, 二云母花岗岩中与黑云母平衡的熔/流体富 F; 黑云母花岗岩、钾长花岗岩与二长花岗岩是相对富 Cl 体系, 黑云母花岗岩演化程度高, 与钨矿化更为密切。

致 谢 野外工作期间得到新疆有色地质勘查局王永强、黄承科等领导的支持。新疆有色地质勘查局地质矿产勘查研究院领导和技术人员也对本项目顺利实施提供了无私帮助。自然资源部海底科学重点实验室为项目研究提供了电子探针测试。在此一并表示感谢。

References

- Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35 (2): 525-541.
- Adam J and Green T. 2006. Trace element partitioning between mica and amphibole-bearing garnet lherzolite and hydrous basanitic melt: 1. Experimental results and the investigation of controls on partitioning behavior[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1): 1-17.
- Ague J J and Brimhall G H. 1988. Regional variations in bulk chemistry, mineralogy, and the compositions of mafic and accessory minerals in the batholiths of California[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 100: 891-911.
- Azadbakht Z, Lentz D R, McFarlane C R M and Whalen J B. 2020. Using magmatic biotite chemistry to differentiate barren and mineralized Silurian-Devonian granitoids of New Brunswick, Canada[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175: 69.
- Bali E, Keppler H and Audétat A. 2012. The mobility of W and Mo in subduction zone fluids and the Mo-W-Th-U systematics of island arc magmas[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 351:195-207.
- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, Branquet Y, Tartèse R and Vigneresse J L. 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. *Geology*, 44 (3): 231-234.
- Bao C J, Chai F M, Li Y, Qi D M, Zhang X B and Tian M. 2021. Geochronology and geochemical characteristics of granitoids in the Bastiellie tungsten polymetallic deposit in the southern margin of Altay: Implications for tungsten mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 886-910(in Chinese with English abstract).
- Candela P A. 1992. Controls on ore metal ratios in granite-related ore systems: An experimental and computational approach[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth*, 83: 317-326.
- Chai F M, Zhang Z C, Wang W, Xie Q H, Huang H, Zhang Y, Qi D M and Zhang X B. 2023. New insights into the multiple magmatic fluid generations from scheelite in the Bastiellie W-polymetallic deposit, Chinese Altay (NW, China)[J]. *Geoscience Frontiers*, 14: 101532.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46 (3): 535-551.
- Che X D, Linnen R L, Wang R C, Aseri A and Thibault Y. 2013. Tungsten solubility in evolved granitic melts: An evaluation of magmatic wolframite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 106: 84-98.
- Coulson I M, Dipple G M and Raudsepp M. 2001. Evolution of Hf and HCl activity in magmatic volatiles of the gold-mineralized Emerald Lake Pluton, Yukon Territory, Canada[J]. *Mineralium Deposita*, 36: 594-606.
- Fan X K, Mavrogenes J, Hou Z Q, Zhang Z Y, Wu X Y and Dai J L. 2019. Petrogenesis and metallogenic significance of multistage granites in Shimensi tungsten polymetallic deposit, Dahutang giant ore field, South China[J]. *Lithos*, 336-337: 326-344.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral mica[J]. Washington: US Geological Survey Professional, 354: 1-48.
- Fulmer E C, Nebel O and Westrenen W V. 2010. High-recision high field strength element partitioning between garnet, amphibole and alkaline melt from Kakanui, New Zealand[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(9): 2741-2759.
- Guo N X, Lü X Q, Zhao Z and Chen Z Y. 2014. Petrological and mineralogical characteristics of two types of metallogenic granitoid formed during the Mesozoic Period, Nanling region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2423-2436(in Chinese with English abstract).
- Guo Y Y, He W Y, Li Z C, Ji X Z, Han Y, Fang W K and Yin C. 2015. Petrogenesis of Ge'erkuohe porphyry granitoid, western Qinling: Constraints from mineral chemical characteristics of biotites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3380-3390(in Chinese with English abstract).
- 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]. *American Mineralogist*, 90(2): 316-328.
- Huang C K, Zhu T L, Li C J and Tong M Y. 2007. Geological general prospecting report of Tiemur iron deposit in Altay, Xinjiang[R]. Internal report. 1-84(in Chinese).
- Ji G Y, Jiang S H, Zhang L S, Li G F, Liu Y F, Yi J J and Zhang S J. 2021. Petrogenetic 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 H, Zhang D Y, Zhou T F, Chen X F, Ye L X, Yu Z D and Xiang X K. 2018. Geochemical characteristics of biotite from igneous rocks in Dahutang tungsten ore district and its implications[J]. *Mineral Deposits*, 37(6): 1147-1167(in Chinese with English abstract).

- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling F H, Zhou R X, Rui J X and Yang Z W. 2002. Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: Implications for granitoid geneses[J]. *Lithos*, 63: 165-187.
- Kepler H and Wyllie P J. 1991. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U and Th between melt and aqueous fluid in the system haplogranite H_2O -HCl and haplogranite H_2O -HF[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109: 139-150.
- 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 the Geological Society of India*, 75(5): 715-730.
- Li H L, Bi X W, Hu R Z, Peng J T, Shuang Y, Li Z L, Li X M and Yuan S D. 2007. Mineral chemistry of biotite in the Qitianling granite associated with the Furong tin deposit: Tracing tin mineralization signatures[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2605-2614(in Chinese with English abstract).
- Li Q, Yang F Q and Yang C D. 2019. Geochronology and geochemical characteristics of Dakalasu granite in Altay of Xinjiang, China and their tectonic significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(4): 396-413 (in Chinese with English abstract).
- Li Y. 2018. Geological characteristics and prospecting significance of Basitielieke scheelite deposit in southern margin of the Altai, Xinjiang[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 41(3): 14-15(in Chinese).
- Lin W W and Peng L J. 1994. The estimation of Fe^{3+} and Fe^{2+} contents amphibole and biotite from EMPA data[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 155-162 (in Chinese with English abstract).
- Liu F, Yang F Q, Mao J W, Chai F M and Geng X X. 2009. Study on chronology and geochemistry for Abagong granite in Altay orogeny[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1416-1425 (in Chinese with English abstract).
- Liu F, Zhang C and Yang F Q. 2012. A study of chronology and ore-forming process of Jialbastro iron deposit on southern margin of Altay[J]. *Mineral Deposits*, 31(6): 1277-1288 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y L, Zhang H, Tang Y, Zhang X, Lü Z H and Zhao J Y. 2017. Petrogenesis and tectonic setting of the Middle Permian A-type granites in Altay, northwestern China: Evidences from geochronological, geochemical, and Hf isotopic studies[J]. *Geological Journal*, 53(2): 527-546.
- Munoz J L. 1984. F-OH and Cl-OH exchange in micas with applications to hydrothermal ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy*, 13 (1): 469-493.
- Munoz J L. 1992. Calculation of HF and HCl fugacities from biotite compositions: Revised equations[J]. *Geological Society of America abstract with Program*, 24, A221.
- Nachit H, Ibhi A, Abia E H and Ohoud M B. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 337 (16): 1415-1420.
- Rasmussen K and Mortensen J. 2013. Magmatic petrogenesis and the evolution of (F:Cl:OH) fluid composition in barren and tungsten skarn-associated plutons using apatite and biotite compositions: Case studies from the northern Canadian Cordillera[J]. *Ore Geology Reviews*, 50: 118-142.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1-64.
- Sarjoughian F, Kananian A, Ahmadian J and Murata M. 2015. Chemical composition of biotite from the Kuh-e Dom pluton, Central Iran: Implication for granitoid magmatism and related Cu-Au mineralization[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 8:1521-1533.
- Scailliet B and Macdonald R. 2004. Fluorite stability in silicic magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(3): 319-329.
- Speer J A. 1984. Micas in igneous rocks[J]. *Reviews in Mineralogy*, 13 (6): 299-356.
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, berens river area, northwest superior Province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 38 (2): 455-470.
- Sun K K, Chen B, Deng J and Ma X H. 2018. Source of copper in the giant Shimensi W-Cu-Mo polymetallic deposit, South China: Constraints from chalcopyrite geochemistry and oxygen fugacity of ore-related granites[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 919-935.
- Stussi J M and Cuney M. 1996. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas by Abdel-Fattah M. Abdel-Rahman: A comment[J]. *Journal of Petrology*, 37: 1025-1029.
- Tang P, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F, Lin B and Tang X Q. 2017. Mineral chemistry of hydrothermal biotites from the Lakang' e porphyry Cu-Mo deposit, Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 265-282 (in Chinese with English abstract).
- Tao J H, Cen T, Long W G and Li W X. 2015. Mineral chemistry of biotites from the Indosinian weakly peraluminous and strongly peraluminous granites in South China and their constraints on petrogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 64-78 (in Chinese with English abstract).
- Tong Y, Wang T, Hong D W, Han B F, Zhang J J, Shi X J and Wang C. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619-641(in Chinese with English abstract).
- Tong Y, Wang T, Jahn B M, Sun M, Hong D W and Gao J F. 2014. Post-Accretionary Permian granitoids in the Chinese Altai Orogeny: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications[J]. *American Journal of Science*, 314: 80-109.
- Van Middelaaar W T and Keith J D. 1990. Mica chemistry as an indicator of oxygen and halogen fugacities in the CanTung and other W-related granitoids in the North American Cordillera[A]. In: Stein H J and Hannah J L, eds. Ore-bearing granite systems; petrogenesis and mineralizing processes[C]. The Geological Society of America Special Papers, 246: 205-220.

- Wang R C, Xie L, Zhu Z Y and Hu H. 2019. Micas: Important indicators of granite-pegmatite-related rare-metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 69-75 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Hong D W, Tong Y, Han B F and Shi Y R. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for continental growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640-650 (in Chinese with English abstract).
- Webster J D and Holloway J R. 1990. Partitioning of F and Cl between magmatic hydrothermal fluids and highly evolved granitic magmas. Ore-bearing granite systems: Petrogenesis and mineralizing processes[M]. The Geological Society of America Special Papers, 246: 21-34.
- Webster J D, Holloway J R and Hervig R L. 1987. Phase equilibria of a Be, U and F-enriched vitrophyre from Spor Mountain, Utah[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3): 389-402.
- Webster J D, Sintoni M F and De Vivo B. 2009. The partitioning behavior of Cl, S, and H₂O in aqueous vapor- $\pm$ saline-liquid saturated phonolitic and trachytic melts at 200 MPa[J]. *Chemical Geology*, 263 (1-4): 19-36.
- Windley B F, Kröner A, Guo J H, Qu G S, Li Y Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. *Journal of Geology*, 110: 719-737.
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: Experiment, theory, and application[J]. *American Mineralogist*, 50: 1228-1272.
- Wood S A and Samson I M. 2000. The hydrothermal geochemistry of tungsten in granitoid environments: I. relative solubilities of ferberite and scheelite as a function of T, P, pH, and NaCl[J]. *Econ. Geol.*, 95(1): 143-182.
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, Wang J M and Yang L. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 47(7): 745-765 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, Sun S L, Li J Y, Qin K Z and Wang Z H. 2004. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339-342.
- Xu K Q and Tu G C. 1986. Relationship between granite geology and mineralization[M]. Nangjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1-645 (in Chinese).
- Yang F Q, Li Y, Chen G M, Zhang G F, Li C, Tian M, Li P and Li Q. 2019. Ore-forming age of the Bastiellie copper tungsten polymetallic deposit in the Altay, Xinjiang: Constraints of zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(6): 1144-1154 (in Chinese with English abstract).
- Yang J J, Zhang G F, Li Y, Li Q, Yang F Q, Tian M and Li P. 2021. Fluid inclusions, stable isotopes (H-O-S), and age constraints on the genesis of the Bastiellie copper tungsten polymetallic deposit in the Altay, Xinjiang, NW China[J]. *Geological Journal*, 56(8):1-22.
- Yang X M and Lentz D R. 2005. Chemical composition of rock-forming minerals in gold-related granitoid intrusions, southwestern New Brunswick, Canada: Implications for crystallization conditions, volatile exsolution, and fluorine-chlorine activity[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 287-305.
- Yu X, Zhao B, Zhang D H, Huang C, Wang X Y and He C Z. 2015. Partition behaviors of tungsten in mineral/melt and solution/melt systems and their effects on mineralization[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 646-653(in Chinese with English abstract).
- Yuan S D, Williams-Jones A E, Romer R L, Zhao P L and Mao J W. 2019. Protolith-related thermal controls on the decoupling of Sn and W in Sn-W metallogenic provinces: Insights from the Nanling region, China[J]. *Econ. Geol.*, 114: 1005-1012.
- Zen E A. 1986. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: Some mineralogical and petrographic constraints[J]. *Journal of Petrology*, 27(5): 1095-1117.
- Zhang G F, Li Y, Yang F Q, Li Q, Yang C D and Chai F M. 2019. Mineral characteristics of Bastiellie W-polymetallic deposit in Altay of Xinjiang and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 38(1): 101-119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Lentz D R, Thorne K G and McFarlane C. 2016. Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W-Mo-Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems[J]. *Ore Geology Reviews*, 77: 82-96.
- Zhang X B, Chai F M, Bao C J and Qi D M. 2021. Geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granitoids from the Jia'erbasidao Fe skarn deposit in Altay, NW China: Implications for tectonic setting and mineralization[J]. *Lithos*, 404-405: 106433.
- Zhang X B, Chai F M, Wang W, Qi D M and Liu Y T. 2022. Geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of Permian granitoids from the South Altay, NW China: Implications for tungsten-copper skarn mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 149: 105101.
- Zhang Y Z, Tian M, Wang W, Zhu C X. 2019. Geological reconnaissance report of Bastiellie copper polymetallic deposit in Fuhai County, Xinjiang[R]. Urumqi: Institute of Geology and Mineral Resources exploration of Xinjiang Nonferrous Geoexploration Bureau. Internal report. 1-132(in Chinese).
- Zhang Z, Duan X X, Chen B, Wang Z Q, Sun K K and Yan X. 2019. Implications of biotite geochemical characteristics for difference of ore-related magmatic system between Wushan copper deposit and Zhuxiling tungsten deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(5): 673-692 (in Chinese with English abstract).
- Zhao M, Yang S Y, Zuo R G, Zhao K D, Jiang Y H, Ling H F and Chen P R. 2015. Magmatic evolution characteristics of Xiangshan volcanic-intrusive complex from the Gan-Hang Belt: Studies on the mineral chemistry of plagioclase and biotite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3): 759-768 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y L, Zhao Z, Zhang C Q, Li H W and Li B J. 2022. Genetic rela-

- tionship between the two-period magmatism and tungsten mineralization in the Yangchuling deposit, Jiangxi Province: Evidence from biotite geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2): 495-512 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z X. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4(3): 63-73 (in Chinese with English abstract).
- Zhu C and Sverjensky D A. 1992. F-Cl-OH partitioning between biotite and apatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(9): 3435-3467.
- ### 附中文参考文献
- 包长甲, 柴凤梅, 李永, 祁冬梅, 张雪冰, 田猛. 2021. 新疆阿尔泰巴斯铁列克钨多金属矿区花岗质岩体年代学和地球化学特征及其对成矿的启示[J]. *岩石学报*, 37(3): 886-910.
- 郭娜欣, 吕晓强, 赵正, 陈震宇. 2014. 南岭地区中生代两种成矿花岗岩的岩石学和矿物学特征探讨[J]. *地质学报*, 88 (12): 2423-2436.
- 郭耀宇, 和文言, 李在春, 耿兴忠, 韩愉, 房维科, 殷超. 2015. 西秦岭格爾括合花岗岩闪长斑岩岩石成因: 黑云母矿物学特征约束[J]. *岩石学报*, 31(1): 3380-3390.
- 黄承科, 朱天伦, 李长江, 童满云. 2007. 新疆阿勒泰市铁米尔特铁矿产普查报告[R]. 内部报告, 84页.
- 李根源, 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.
- 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 双燕, 李兆丽, 李晓敏, 袁顺达. 2007. 芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩黑云母矿物化学组成及其对锡成矿的指示意义[J]. *岩石学报*, 23(10): 2605-2614.
- 李强, 杨富全, 杨成栋. 2019. 新疆阿尔泰大喀拉苏花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地球科学与环境学报*, 41(4): 396-413.
- 李永. 2018. 新疆阿尔泰南缘巴斯铁列克白钨矿床地质特征及找矿意义[J]. *新疆有色金属*, 41(3): 14-15.
- 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 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. *长春地质学院学报*, 24(2): 155-162.
- 刘锋, 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 耿新霞. 2009. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体年代学及地球化学研究[J]. *岩石学报*, 25(6): 1416-1425.
- 刘锋, 张超, 杨富全. 2012. 新疆阿尔泰南缘加尔巴斯套铁矿床成矿时代及成矿作用研究[J]. *矿床地质*, 31(6): 1277-1288.
- 唐攀, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 林彬, 唐晓倩. 2017. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床黑云母矿物化学特征[J]. *地学前缘*, 24(5): 265-282.
- 陶继华, 岑涛, 龙文国, 李武显. 2015. 华南印支期弱过铝质和强过铝质花岗岩中黑云母的矿物化学及其岩石成因制约[J]. *地学前缘*, 22(2): 64-78.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊, 王超. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 619-641.
- 王汝成, 谢磊, 诸泽颖, 胡欢. 2019. 云母: 花岗岩-伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物[J]. *岩石学报*, 35(1): 69-75.
- 王涛, 洪大卫, 童英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. *岩石学报*, 21(3): 640-650.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745-765.
- 徐克勤, 涂光炽. 1986. 花岗岩地质和成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1-645.
- 杨富全, 李永, 陈贵民, 张国锋, 李超, 田猛, 李鹏, 李强. 2019. 新疆阿尔泰巴斯铁列克钨多金属矿成矿时代-来自锆石 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄约束[J]. *大地构造与成矿学*, 43(6): 1144-1154.
- 喻晓, 赵博, 张德会, 黄诚, 王新彦, 和成忠. 2015. 钨在矿物/熔体和溶液/熔体中的分配行为及其对成矿作用的影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 646-653.
- 张国锋, 李永, 杨富全, 李强, 杨成栋, 柴凤梅. 2019. 新疆阿尔泰巴斯铁列克钨多金属矿矿物特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 38(1): 101-119.
- 张永智, 田猛, 汪伟, 朱成星. 2019. 新疆福海县巴斯铁列克铜多金属矿预查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院. 内部报告, 132页.
- 张振, 段晓侠, 陈斌, 王志强, 孙克克, 严翔. 2019. 黑云母地球化学特征对武山铜矿和竹溪岭钨矿成矿岩浆体系差异的指示[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(5): 673-692.
- 赵沔, 杨水源, 左仁广, 赵葵东, 姜耀辉, 凌洪飞, 陈培荣. 2015. 赣杭构造带相山火山侵入杂岩的岩浆演化特征—来自斜长石和黑云母的化学成分研究[J]. *岩石学报*, 31(3): 759-768.
- 郑瑜林, 赵正, 张长青, 李宏伟, 李彪江. 2022. 西阳储岭两期岩浆活动与钨成矿作用的关系: 来自黑云母地球化学的证据[J]. *岩石学报*, 38 (2): 495-512.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 4(3): 63-73.