

新疆东准噶尔坝西早石炭世石英闪长岩及其对斑岩铜矿的指示意义

张铭鸿, 姚 勇, 程志国, 张招崇

(中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 新疆东准噶尔琼河坝地区位于中亚成矿域中段, 虽然该地区近年来相继发现了一系列的古生代斑岩铜(钼)矿床, 但矿床规模均较小, 其成矿潜力有待进一步评价。坝西铜矿床是其中的一个代表性斑岩铜矿。与斑岩铜矿矿化密切相关的是石英闪长岩和石英二长闪长岩, 获得其中石英闪长岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 345.7 ± 3.0 Ma, 说明其形成于早石炭世。石英闪长岩和石英二长闪长岩的斜长石并不是通常的中长石, 而是更加富钙的拉长石。全岩地球化学分析结果表明, 它们为准铝质-弱过铝质的钙碱性 I 型花岗岩类, 微量元素原始地幔标准化曲线展示出大离子亲石元素相对富集、高场强元素相对亏损并有明显的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常, 显示出典型的岛弧岩浆岩的特征。岩石中具有暗色微细粒镁铁质包体、正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($+13.66 \sim +15.56$) 和岩体中的富钙斜长石暗示了其形成于幔源基性岩浆与新生地壳部分熔融的酸性岩浆的混合。基于角闪石成分计算结果, 其压力为 $28.6 \sim 166.9$ MPa, 相当于大约 $0.6 \sim 3.1$ km, 温度 $673 \sim 908^\circ\text{C}$, 水含量约 $3.18\% \sim 4.64\%$, 氧逸度为 $\Delta\text{NNO} - 0.22 \sim \Delta\text{NNO} + 3.27$ 。结合其产出的构造背景以及矿区地球物理异常, 岩浆高的水含量与高的氧逸度条件说明该区具有很好的斑岩铜矿找矿潜力。

关键词: 石英闪长岩; 岩浆源区; 物理化学条件; 成矿潜力; 坝西铜矿

中图分类号: P618.41; P588.12⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0153-16

Early Carboniferous quartz diorite in the Baxi copper deposit, East Junggar: Insight into potential for porphyry copper deposits

ZHANG Ming-hong, YAO Yong, CHENG Zhi-guo and ZHANG Zhao-chong

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

Abstract: The Qionghaba area in the East Junggar terrain is located in the middle section of the Central Asian metallogenic domain. Although many Paleozoic porphyry copper (molybdenum) deposits have been discovered in this area in recent years, these deposits are all small in scale and the metallogenic potential requires further evaluation. The Baxi copper deposit is one of the typical and representative porphyry copper deposits. The quartz diorite and quartz monzodiorite are closely related to porphyry copper mineralization. The zircon mean U-Pb weighted average age of quartz diorite is 345.7 ± 3.0 Ma, indicating that it was formed in the Early Carboniferous. The plagioclase in quartz diorite and quartz monzonite is not andesine that is common in intermediate rocks, but calcium-rich labradorite. The bulk-rock geochemical characteristics show that they have meta-aluminum-weak peraluminum calc-alkaline I-type geochemical signatures. The primitive mantle normalized incompatible element patterns show the enrich-

收稿日期: 2020-07-25; 接受日期: 2020-11-20; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41390442, 41772057)

作者简介: 张铭鸿(1997-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 626760464@qq.com; 通讯作者: 程志国(1987-), 男, 博士, 主要从事岩浆作用与成矿的研究, E-mail: cugbczg@163.com.

ment of large ion lithophile elements relative to high field strength elements as well as significantly negative Nb, Ta and Ti anomalies, suggesting a typical island arc-like geochemical feature. The mafic microgranular enclaves (MMEs), positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (+13.66~+15.56) and the calcium-rich plagioclase in the rocks suggest that the magma originated from the mantle-derived basic magma mixed with felsic magma derived from juvenile crust. Based on the amphibole compositions, the authors calculated the pressure (28.6~166.9 MPa, equivalent to 0.6~3.1 km), temperature (673~908°C), water content (3.18%~4.64%), and oxygen fugacity ($\Delta\text{NNO}-0.22\sim\Delta\text{NNO}+3.27$). Combined with the tectonic setting and geophysical anomaly of the mining area, the high water content and oxygen fugacity of magmas indicate that the area has good prospecting potential for porphyry copper deposits.

Key words: quartz diorite; magma source area; physical and chemical conditions; metallogenic potential; Baxi copper deposit

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41390442, 41772057)

中亚成矿域是世界三大成矿域之一,蕴含丰富的矿产资源(朱永峰等, 2007; 薛春纪等, 2010; 高俊等, 2019),在哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦及蒙古等国境内均发现有一系列超大型及众多大中型斑岩型铜钼金矿床(图1),如 Bozshakol、Nurkazgan、Kounrad、Aktogai、Taldy Bulak、Koksai、Aidarly、Kalmakyr、Oyu Tolgoi 及 Erdenet 等世界级超大型斑岩铜、铜-钼及铜-金型矿床(Seltmann and Porter, 2005; Mao *et al.*, 2014; 申萍等, 2015; 高俊等, 2019)。我国新疆北部位位于中亚成矿域西段,西与哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦相接,东与蒙古国相邻,但矿床数量及规模均明显低于周边国家和地区(董连慧等, 2009; 杨富全等, 2010),是找矿勘查工作程度低还是成矿条件本身问题尚不明朗。

琼河坝矿集区位于中亚成矿域西段东准噶尔琼河坝铁、铜、金、钼、明矾石成矿带,地理上与蒙古国相邻,是中亚造山带在我国境内重要的成矿区带之一,目前初步查明有多处铜、铁、金等金属矿床(点),前人从矿床地质、地球化学、地球物理等方面对琼河坝矿集区的矿床成因、成矿模型及成矿潜力等进行了研究,相关成果对区内进一步找矿勘查具有重要的启示意义(张招崇等, 2006; 屈迅等, 2009; Qu *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010a, 2010b; 张永等, 2010a, 2010b; 王军等, 2010; 梁广林等, 2010; 刘建朝等, 2014)。近年来,琼河坝矿集区找矿勘查工作取得了一系列重要成果,区内已查明有蒙西、和尔赛、铜华岭、绿石沟、拉伊克勒克、琼河坝和桑南等众多中-小型规模的斑岩型铜矿床(点),显示出一定的找矿前景,但是尚未实现斑岩铜矿找矿的重大突破。坝西铜矿的发现是琼河坝矿集区最新取得的地质工

作成果之一(王斯林等, 2017, 2018)。本文将通过对坝西铜矿成矿岩体的矿物学、岩石学、地球化学特征以及锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征的研究,分析其成矿潜力,以期为该铜矿勘探找矿工作提供一些新的线索。

1 成矿地质背景

琼河坝地区大地构造位置位于准噶尔板块谢米斯台-野马泉-琼河坝古生代岛弧带东段。该岛弧带是由晚古生代火山岩叠加于早古生代岛弧上形成的古生代复合岛弧带。

琼河坝地区地层自北向南大致呈 NWW 向,依次为奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系和侏罗系,该地区大部分被第四系沉积物覆盖(图2a)。区域构造主要为与准噶尔地区地体拼贴接合作用相关的 NWW 向断裂和褶皱及其派生的次级构造。侵入岩体以志留纪花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩等为主,泥盆纪花岗闪长斑岩呈岩枝、岩脉状侵入其中,该套岩体主要侵位到奥陶系绿片岩相变质火山沉积岩中。

2 矿床地质特征

矿区出露地层以中泥盆统库鲁木迪组为主,呈残留孤岛状分布,岩性主要为安山质晶屑凝灰岩、安山岩。矿区构造以断裂为主,早期发育 NW 向次级断裂构造、晚期发育近 EW 向断裂构造。矿区侵入岩主要可分为两期,早期岩体为区域上广泛出露的志留纪至泥盆纪花岗闪长岩、二长闪长岩和正长花岗

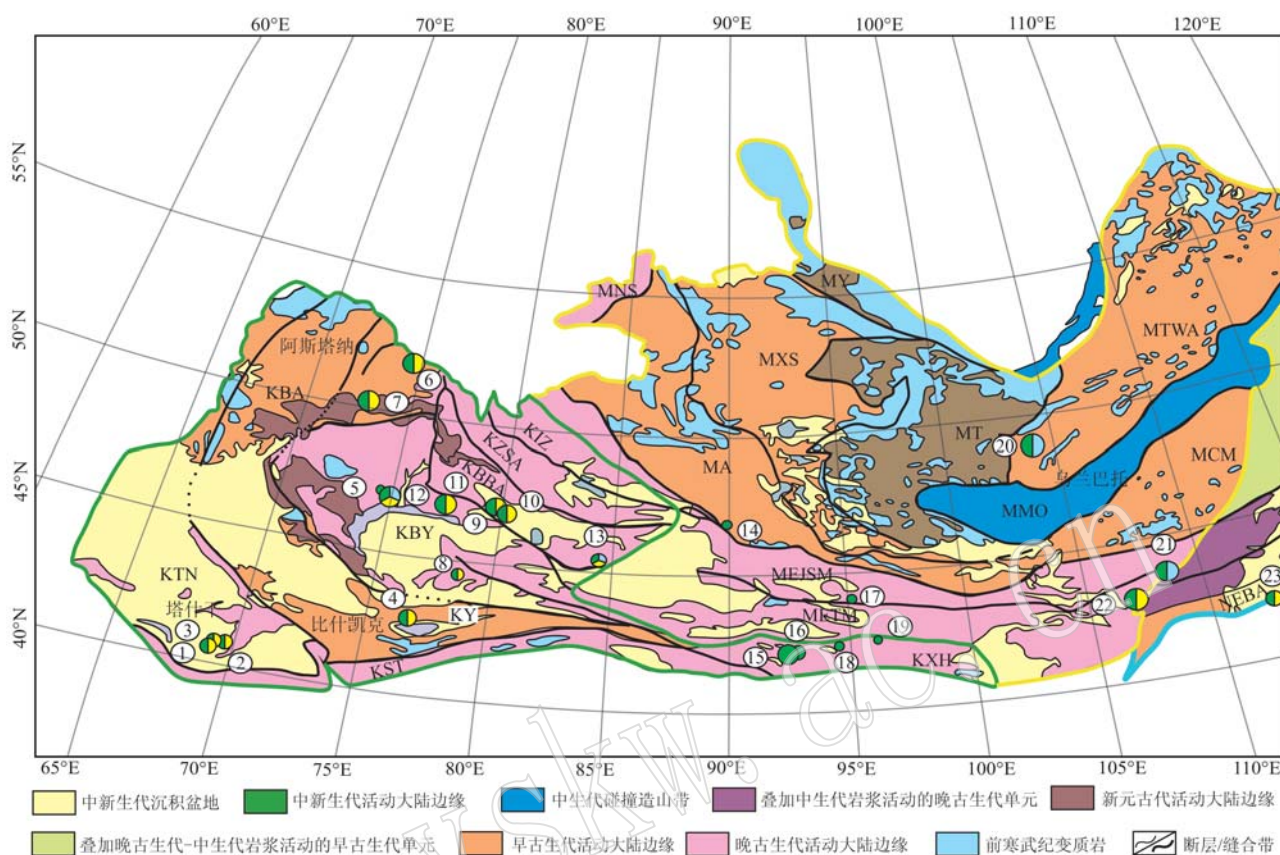


图1 中亚成矿区域中西段斑岩铜钼金矿床分布图(据高俊等, 2019 修改)

Fig. 1 Distribution of porphyry copper-molybdenum-gold deposits in the central and western parts of the Central Asian metallogenic domain (modified after Gao Jun *et al.*, 2019)

KTN—泥盆纪巴尔喀什火山弧; KBA—晚古生代塔什干-纳伦增生边缘; KY—早古生代伊塞克陆缘; KST—晚古生代南天山增生陆缘; KBY—晚古生代巴尔喀什-伊犁增生边缘; KBBA—泥盆-石炭纪巴尔喀什北部-巴尔鲁克火山弧; KZSA—泥盆-石炭纪扎玛尔-萨吾尔火山弧; KIZ—晚古生代额尔齐斯-斋桑碰撞造山带; KXH—晚古生代星星峡-早山增生边缘; METM—晚古生代东天山-蒙古增生边缘; MEJSM—晚古生代东准噶尔-南蒙古增生边缘; MA—早古生代阿尔泰增生边缘; MXS—早古生代新彼得罗沃-萨彦岭增生边缘; MMO—侏罗纪蒙古-鄂霍茨克碰撞造山带; MT—新元古代图瓦增生边缘; MTWA—早古生代外贝加尔-维吉姆火山弧; MCM—早古生代中蒙古增生边缘; NEBA—早古生代白乃庙火山弧; 矿床名称: ①—Kalmakyr; ②—Dalneye; ③—Sarycheku; ④—TaldyBulak; ⑤—Borly; ⑥—Bozshakol; ⑦—Nurkazgan; ⑧—Koksai; ⑨—Aktogai; ⑩—Aidarly; ⑪—Sayak; ⑫—Kounrad; ⑬—包右图; ⑭—玉勒肯喀拉苏-喀拉苏; ⑮—延东; ⑯—土屋; ⑰—琼河坝; ⑱—三岔口; ⑲—公婆泉; ⑳—Erdenet; ㉑—TsagaanSuvarga; ㉒—Oyutolgoi; ㉓—Bainaimiao

KTN—Devonian Balkhash volcanic arc; KBA—Late Paleozoic Tashkent-Nalen accretionary margin; KY—Early Paleozoic Yisaike continental margin; KST—Late Paleozoic South Tianshan accretionary margin; KBY—Late Paleozoic Balkhash-Yili accretionary margin; KBBA—Devonian-Carboniferous northern Balkhash-Baerluke volcanic arc; KZSA—Devonian-Carboniferous Zamaer-Sawuer volcanic arc; KIZ—Late Paleozoic Irtysh-Zaysan collision orogenic belt; KXH—Late Paleozoic Xingxingxia-Hanshan accretion margin; METM—Late Paleozoic Eastern Tianshan-Mongol accretionary margin; MEJSM—Late Paleozoic Eastern Junggar-South Mongol accretionary margin; MA—Early Paleozoic Altay accretionary margin; MXS—Early Paleozoic Xinbideluowo-Sayan accretionary margin; MMO—Jurassic Mongol-Okhotsk collision orogenic belt; MT—Neoproterozoic Tuva accretionary margin; MTWA—Early Paleozoic Transbaikial-Weijimu volcanic arc; MCM—Early Paleozoic Central Mongol accretionary margin; NEBA—Early Paleozoic Bainaimiao volcanic arc; Ore deposits: ①—Kalmakyr; ②—Dalneye; ③—Sarycheku; ④—TaldyBulak; ⑤—Borly; ⑥—Bozshakol; ⑦—Nurkazgan; ⑧—Koksai; ⑨—Aktogai; ⑩—Aidarly; ⑪—Sayak; ⑫—Kounrad; ⑬—Baogutu; ⑭—Yulekenkalasu-Kalasu; ⑮—Yandong; ⑯—Tuwu; ⑰—Qionghaba; ⑱—Sanchakon; ⑲—Gongpoquan; ⑳—Erdenet; ㉑—Tsagaan Suvarga; ㉒—Oyutolgoi; ㉓—Bainaimiao

岩,矿化较弱或不含矿,是铜矿的围岩之一,晚期侵入岩为早石炭世石英闪长岩、石英二长闪长岩和侵入其中的闪长玢岩脉,它们侵入于早期的志留纪-泥盆纪岩体中,但面积较小,约 0.06 km²。石英闪长岩与石英二长闪长岩呈过渡关系,前者为主体,分布在中心,后者作为边缘相出现。其中铜矿化主要与石英

闪长岩、石英二长闪长岩有关。此外矿区内还有一些中酸性岩脉侵入在志留纪和早石炭世岩体中。

坝西铜矿床已查明有南北两条矿带,以南矿带为主,总体呈近 NW-SE 向延伸,与区域构造线方向一致(图 2b)。南矿带沿 NW-SE 走向延伸约 1 km,地表北西侧矿带侵入至中泥盆统库鲁木迪组安山质

晶屑凝灰岩、安山岩中。北矿带矿化较弱,地表孔雀石化、褐铁矿化及黄钾铁矾化发育,目前发现 3 条矿体。矿体几何形态呈似层状、透镜状,倾向 NE,倾角

65°~85°,最大控制深度 700 m。目前已控制矿化体规模为小型,铜品位为 0.2%~0.4%。

根据矿物组合特征,大致可划分出4个蚀变带:

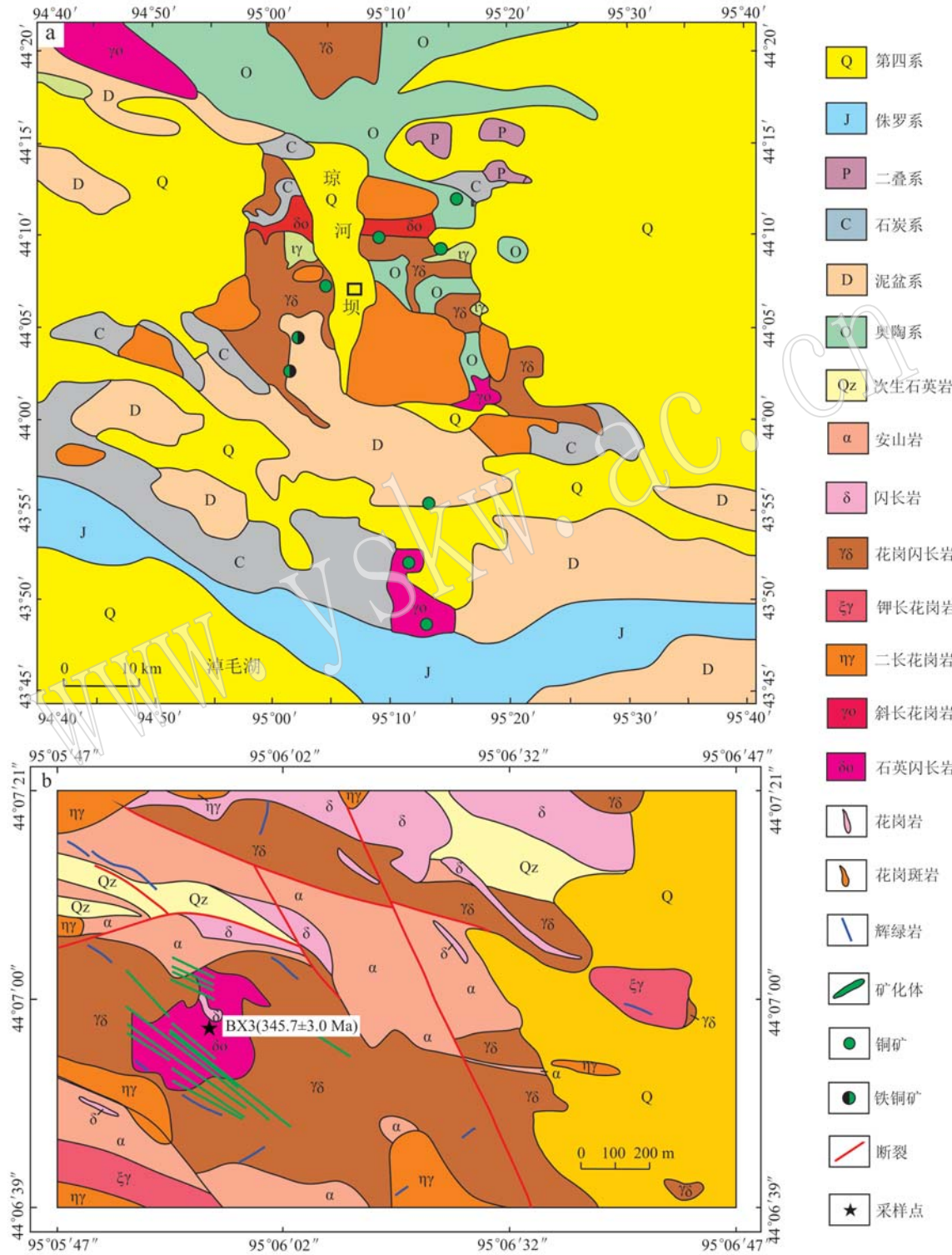


图 2 东准噶尔琼河坝岛弧区域地质图(a, 据屈迅等, 2009 修改)和坝西铜矿矿区地质图(b, 据王斯林等, 2017 修改)
Fig. 2 Regional geological sketch map of the Qionghaba island arc (a, modified after Qu Xun *et al.*, 2009) and geological map of the Baxi copper deposit in East Junggar (b, modified after Wang Silin *et al.*, 2017)

钾化带、绢英岩化带、泥英岩化带、青磐岩化带。钾化带位于蚀变带中心,矿物组合以石英-钾长石-黑云母为主,绢云母化和电气石化发育,分布较为局限,蚀变原岩主要为闪长玢岩脉;绢英岩化带部分叠加在钾化带上,矿物组合以石英-绢云母为主,绿泥石化和电气石化局部发育,是铜矿体主要赋存部位,原岩为石英闪长岩;泥英岩化带主要蚀变矿物为高岭石、绿泥石和沸石等,分布于绢英岩化带外侧,有少量铜化体分布,原岩为边缘相石英二长闪长岩;青磐岩化带分布于最外侧,浅黄绿色到灰绿色,主要由绿泥石化、绿帘石化组成,原岩为安山质晶屑岩屑凝灰岩,局部裂隙中有少量铜矿化体分布。

矿区矿石矿物组成较为简单,以黄铜矿和黄铁矿为主,此外还有少量磁铁矿、辉钼矿等。矿石结构为中细粒半自形至他形粒状,构造以细脉浸染状为主,浸染状及斑团状次之。黄铜矿它形,铜黄色,可见浸染状及细脉浸染状矿化,部分矿石中与黄铁矿

共生。

3 早石炭世岩体的岩相学特征

石英闪长岩呈灰白色,中粒半自形粒状结构,块状构造,粒度约 0.2~5 mm,斜长石含量 60%~70%,石英含量 15%~20%,钾长石含量<10%,暗色矿物以黑云母为主,含量约 10%,角闪石含量较低,副矿物以磁铁矿为主。斜长石普遍遭受蚀变,以绢云母化蚀变为主,部分黑云母绿泥石化(图 3a、3b)。

石英闪长岩中可见椭球状及团斑状暗色包体,大小约 2 cm×2 cm~6 cm×10 cm,半自形到他形微细粒-细粒结构,粒度约 0.1~0.4 mm,以自形到半自形斜长石、石英、黑云母及角闪石为主,浅色矿物含量 65%~75%,暗色矿物含量 20%~30%,此外还有约 1%的磁铁矿、钛铁矿等副矿物,包体与寄主石英闪长岩截然接触(图 3c、3d)。

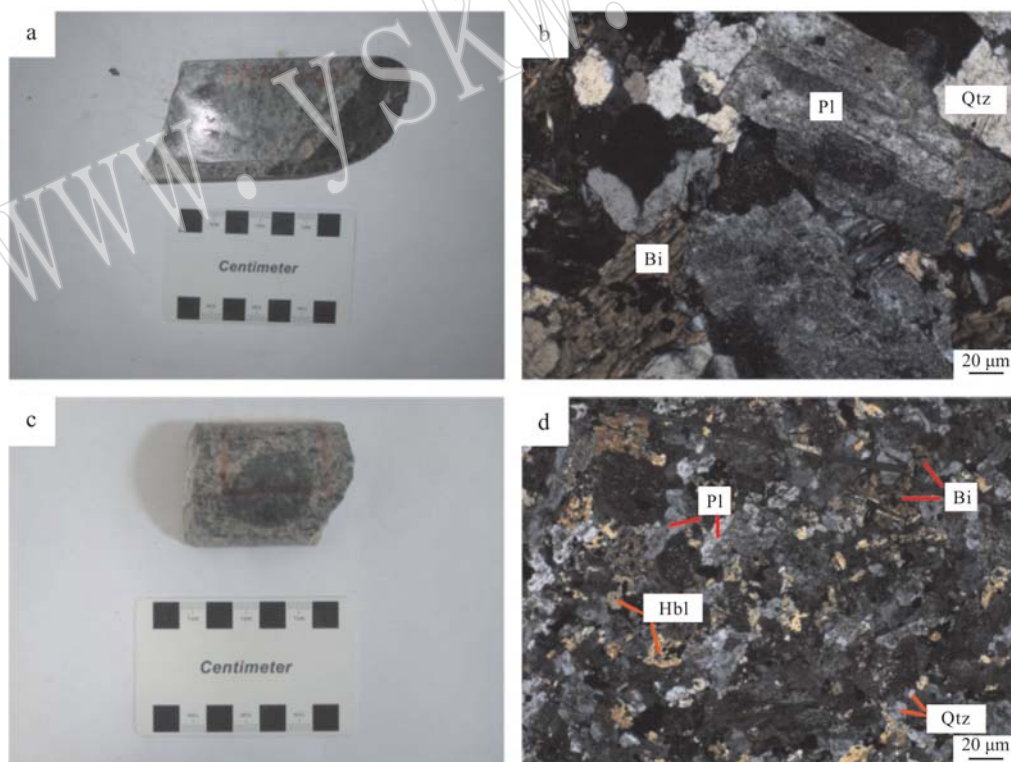


图 3 石英闪长岩以及其中包体的手标本和显微镜下照片

Fig. 3 Hand specimens and microphotographs of quartz diorite and enclaves

a—石英闪长岩手标本照片; b—中粒半自形石英闪长岩显微镜下照片(+); c—石英闪长岩中的暗色包体; d—暗色闪长质包体显微镜

下照片,岩石呈细粒结构,少量石英呈他形结构(+); Pl—斜长石; Qtz—石英; Bi—黑云母; Hbl—普通角闪石

a—hand specimen of quartz diorite; b—microphotograph of medium-grained subhedral quartz diorite(+); c—hand specimen of mafic microgranular enclave in quartz diorite; d—microphotograph of mafic microgranular enclave with fine-grained texture and a small amount of anhedral quartz(+);

Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Bi—biotite; Hbl—hornblende

石英二长闪长岩呈浅肉灰色-灰白色,中细粒自形到半自形粒状结构,块状构造,矿物组成与石英闪长岩相似,钾长石含量明显升高,约10%~20%。

闪长玢岩呈斑状结构,块状构造,斜长石斑晶粒径约在3~8 mm,与铜矿化的关系密切。

4 样品及测试方法

本次研究的对象主要为和成矿密切相关的石英闪长岩岩体的岩心样品(如ZK2901、ZK2902、ZK1701以及ZK3702等),还采集了矿区地表较为新鲜的年龄样品(BX3)。角闪石及斜长石的电子探针分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针室完成。分析仪器为EPMA-6000,实验条件为加速电压15 kV,电流20 nA,束斑直径5 μm ,数据采用ZAF修正计算。

主量和微量元素分析在国家地质实验测试中心完成。主量元素和微量元素分析方法分别为XRF和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)。其中FeO和Fe₂O₃由湿化学分析法分析。

锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb定年和Hf同位素分析在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学实验室和矿产资源研究所完成。锆石U-Pb定年工作所用的MC-ICP-MS为美国Thermo Fisher公司最新一代Neptune Plus型多接收等离子体质谱仪。采用的激光剥蚀系统为美国Coherent公司生产的GeoLasPro 193 nm。本次U-Pb定年实验激光剥蚀以氦气作为剥蚀物质的载气,激光剥蚀束斑直径为24 μm ,激光能量密度为10 J/cm²,频率为8 Hz,每个分析点的气体背景采集时间为4 s,信号采集时间为23 s。实验测定及校准标样为标准锆石91500,采用GJ-1作为辅助标样验证数据准确性。采用ICPMS-DataCal程序(Liu *et al.*, 2010)和Isoplot 3.0程序(Ludwig, 2003)进行数据处理;年龄计算以标准锆石91500为外标进行同位素比值分馏。测定时采用标准锆石91500作为参考物质,选点位置与相应U-Pb定年位置相同,相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007, 2009)。

5 分析结果

5.1 岩体锆石 U-Pb 年龄和锆石 Hf 同位素

分析结果见表1。石英闪长岩(BX3)的锆石多

为灰白色,形态主要为短柱状-粒状,颗粒较小,粒径多为60~100 μm ,岩浆震荡环带发育(图4),无明显继承核结构。26颗锆石的26个点中,1号点与6号点未得出有效一致年龄,得出有效一致年龄的24个点全部落在谐和线上及附近(图5),其²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和年龄为346.6 $\pm$ 3.6 Ma,MSWD=0.38,加权平均年龄为345.7 $\pm$ 3.0 Ma,MSWD=0.40,为早石炭世。本文采用加权平均年龄作为岩体年龄,分析所得每个样品的谐和年龄具有不同的误差,加权平均年龄更真实的反映了岩体年龄以及误差的大小。

对13颗已测U-Pb年龄锆石进行了原位Hf同位素分析结果见表2。从表2可以看出,其¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值范围分别为0.036 940~0.093 871和0.000 980~0.002 345,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值为0.282 954~0.283 012,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf平均值为0.282 976 $\pm$ 0.000 036。根据锆石U-Pb年龄和Lu-Hf同位素测试结果计算得出 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为+13.66~+15.64,两阶段模式年龄值变化于499~353 Ma。

5.2 矿物学特征

石英闪长岩的斜长石和角闪石的电子探针分析结果见表3和表4。从表3可以看出,斜长石的成分为An_{70~55}Ab_{29~44}Or₁,属于拉长石,明显较一般的中性岩类中的斜长石要富钙,中性岩类的斜长石通常为中长石。

从表4可以看出,角闪石的成分非常均匀,均为钙质角闪石。Ridolfi等(2012)根据过去的角闪石经验公式和新的实验数据,可以计算钙碱性和碱性岩石中的富Mg钙质角闪石的温度、压力、水含量以及氧逸度。根据该方法,计算得到角闪石形成的压力为28.6~166.9 MPa,相当于大约0.6~3.1 km,温度673~908℃,水含量约3.18%~4.64%,氧逸度为 $\Delta\text{NNO}-0.22\sim\Delta\text{NNO}+3.27$ 。计算结果显示出较高的水含量与斜长石高的牌号(An为70~55)一致,因为在高的水含量条件下,岩浆中结晶的斜长石牌号要比低水含量结晶出的斜长石牌号高。

5.3 主量元素和微量元素特征

石英闪长岩的主要元素和微量元素分析结果见表5。从表5可以看出,其SiO₂含量为58.97%~64.89%;Al₂O₃含量为16.5%~19.48%,A/CNK值为0.79~1.14,表现为准铝质到弱过铝质的特征,高的A/CNK值主要与绢云母化有关。里特曼指数 $[\sigma=(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})_2/(\text{SiO}_2-43)]$ 为1.21~2.27,属于钙碱性系列。

表 1 石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄测定结果
Table 1 Zircon U-Pb ages of quartz diorite

样号及点号	$w_B/10^{-6}$					同位素比值					年龄/Ma				
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1s	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1s	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
BX3-02	105.0	362.0	256.9	1.409 2	0.054 7	0.000 5	0.407 2	0.016 9	0.054 0	0.002 2	466.7	16.7	346.9	12.2	338.8
BX3-03	41.9	125.7	115.7	1.086 2	0.053 8	0.000 6	0.412 5	0.011 3	0.055 6	0.001 4	361.2	22.2	350.7	8.2	348.9
BX3-04	51.6	159.6	168.8	0.945 5	0.054 8	0.001 2	0.415 4	0.013 4	0.055 0	0.001 4	446.7	50.0	352.8	9.7	345.3
BX3-05	39.1	116.2	108.5	1.071 6	0.053 4	0.000 6	0.414 4	0.014 0	0.056 2	0.001 8	346.4	22.2	352.0	10.1	352.7
BX3-07	66.0	205.6	201.8	1.018 9	0.053 6	0.000 5	0.401 8	0.010 7	0.054 3	0.001 4	353.8	22.2	342.9	7.8	341.1
BX3-08	35.7	101.3	118.8	0.852 5	0.053 9	0.000 7	0.418 3	0.017 6	0.056 2	0.002 1	368.6	13.9	354.8	12.6	352.6
BX3-09	152.0	514.8	354.1	1.453 9	0.053 6	0.000 5	0.401 2	0.015 5	0.054 3	0.002 0	353.8	22.2	342.5	11.2	340.7
BX3-10	58.0	187.5	153.0	1.225 2	0.053 7	0.000 6	0.402 9	0.014 3	0.054 4	0.001 9	366.7	27.8	343.8	10.3	341.5
BX3-11	54.7	172.1	166.0	1.036 9	0.053 3	0.000 6	0.402 2	0.015 4	0.054 7	0.001 9	342.7	8.3	343.2	11.2	343.3
BX3-12	70.0	219.7	193.5	1.135 2	0.054 8	0.003 9	0.417 0	0.037 8	0.054 7	0.001 1	405.6	161.1	353.9	27.1	344.8
BX3-13	95.0	313.7	247.8	1.265 9	0.053 5	0.000 5	0.399 4	0.011 8	0.054 2	0.001 5	350.1	36.1	341.2	8.6	340.0
BX3-14	75.0	232.1	205.5	1.129 1	0.056 8	0.001 7	0.423 6	0.016 7	0.054 0	0.001 0	483.4	66.7	358.6	11.9	339.3
BX3-15	26.2	73.7	102.0	0.723 1	0.054 5	0.001 9	0.425 7	0.019 5	0.056 6	0.001 5	394.5	77.8	360.1	13.9	354.9
BX3-16	39.5	123.9	148.7	0.833 8	0.053 1	0.000 6	0.396 7	0.008 9	0.054 1	0.001 1	344.5	27.8	339.2	6.5	339.9
BX3-17	75.0	234.7	201.1	1.167 1	0.053 3	0.000 5	0.411 7	0.010 4	0.056 0	0.001 3	342.7	8.3	350.1	7.5	351.4
BX3-18	46.4	137.7	183.8	0.749 0	0.053 7	0.000 5	0.406 8	0.009 1	0.055 0	0.001 1	366.7	22.2	346.6	6.6	345.0
BX3-19	46.0	145.9	140.0	1.042 3	0.053 7	0.000 6	0.415 3	0.012 3	0.056 1	0.001 6	366.7	27.8	352.7	8.8	351.9
BX3-20	54.3	165.7	174.6	0.949 1	0.054 1	0.000 7	0.422 1	0.009 8	0.056 6	0.001 1	376.0	33.3	357.5	7.0	354.8
BX3-21	40.0	126.1	129.8	0.971 5	0.053 7	0.000 6	0.417 3	0.010 7	0.056 3	0.001 4	361.2	22.2	354.1	7.7	353.1
BX3-22	31.8	98.3	132.7	0.740 7	0.053 2	0.000 6	0.405 6	0.010 6	0.055 4	0.001 4	344.5	22.2	345.7	7.7	347.3
BX3-23	35.2	112.1	139.5	0.803 9	0.053 2	0.000 6	0.401 9	0.007 4	0.054 8	0.001 0	344.5	22.2	343.0	5.4	344.0
BX3-24	85.0	285.8	231.9	1.232 7	0.053 6	0.000 5	0.404 3	0.007 0	0.054 7	0.000 9	353.8	22.2	344.7	5.1	343.4
BX3-25	26.8	85.6	80.9	1.058 5	0.056 5	0.001 6	0.427 5	0.014 5	0.054 8	0.000 7	472.3	75.0	361.4	10.3	344.2
BX3-26	65.0	209.1	217.6	0.960 9	0.053 5	0.000 5	0.409 1	0.006 7	0.055 5	0.001 0	350.1	36.1	348.2	4.9	348.2

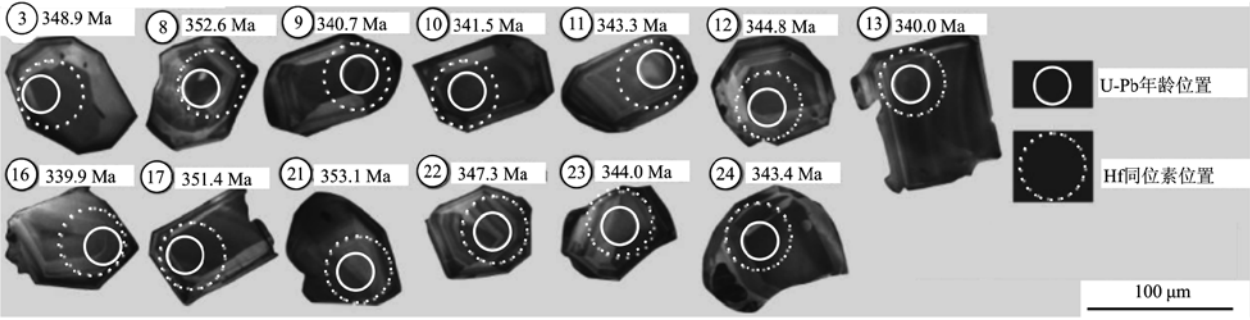


图 4 石英闪长岩岩体锆石样品阴极发光 (CL) 图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircon separated from quartz diorite

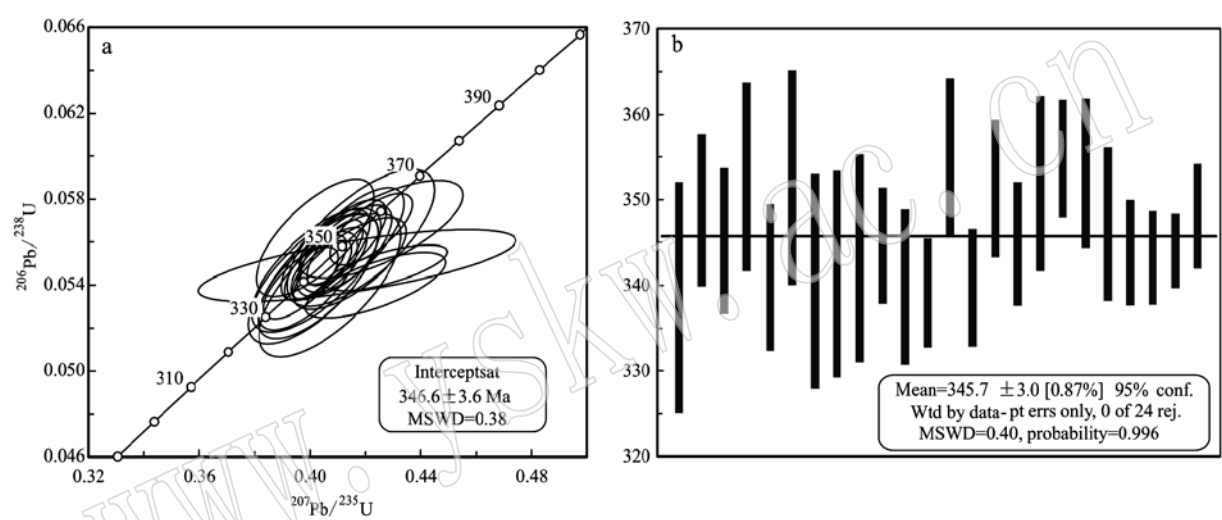


图 5 石英闪长岩中的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 谐和年龄(a) 及加权平均年龄(b)

Fig. 5 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age (b) from quartz diorite

表 2 石英闪长岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Lu-Hf isotopic data of zircons separated from quartz diorite

样号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$	f_{Hf}
BX3-03	349	0.066 001	0.000 657	0.001 659	0.000 024	0.282 972	0.000 019	7.06	14.36	404	436	-0.95
BX3-08	353	0.061 329	0.001 472	0.001 818	0.000 075	0.283 006	0.000 024	8.29	15.64	355	357	-0.95
BX3-09	341	0.093 871	0.001 950	0.002 345	0.000 052	0.282 980	0.000 025	7.36	14.34	399	431	-0.93
BX3-10	342	0.069 897	0.000 543	0.001 173	0.000 014	0.282 976	0.000 020	7.20	14.33	400	433	-0.95
BX3-11	343	0.050 938	0.002 098	0.001 330	0.000 059	0.282 997	0.000 018	7.97	15.22	364	376	-0.96
BX3-12	345	0.069 815	0.000 741	0.001 746	0.000 012	0.282 867	0.000 020	6.90	14.10	412	499	-0.95
BX3-13	340	0.090 783	0.001 127	0.002 268	0.000 025	0.282 961	0.000 022	6.69	13.66	427	474	-0.93
BX3-16	340	0.036 940	0.000 496	0.000 980	0.000 013	0.283 001	0.000 019	8.10	15.37	355	364	-0.97
BX3-17	351	0.089 104	0.002 023	0.002 228	0.000 055	0.282 975	0.000 023	7.19	14.40	405	435	-0.93
BX3-21	353	0.046 994	0.000 161	0.001 195	0.000 006	0.282 954	0.000 020	6.45	13.94	424	466	-0.96
BX3-22	347	0.065 432	0.001 580	0.001 648	0.000 044	0.283 007	0.000 020	8.30	15.56	353	357	-0.95
BX3-23	344	0.057 892	0.000 777	0.001 494	0.000 028	0.282 981	0.000 023	7.39	14.63	389	415	-0.95
BX3-24	343	0.090 040	0.000 584	0.002 197	0.000 022	0.283 012	0.000 026	8.50	15.55	351	355	-0.93

表 3 斜长石电子探针分析结果
Table 3 Electron microprobe analyses of plagioclase

 $w_B/\%$

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量	斜长石端员		
											An	Ab	Or
83-1	54.68	0.17	26.85	0.50	0.07	—	11.51	5.29	0.19	99.26	70	29	1
83-2	56.13	0.03	26.57	0.32	0.03	0.04	10.69	5.82	0.16	99.79	66	33	1
83-3	59.18	0.01	24.71	0.30	—	0.06	7.94	7.01	0.20	99.41	55	44	1

注：—检测限以下。

其 ΣREE 为 $69.17 \times 10^{-6} \sim 81.82 \times 10^{-6}$, LREE 为 $57.42 \times 10^{-6} \sim 69.60 \times 10^{-6}$, HREE 为 $11.75 \times 10^{-6} \sim 14.10 \times 10^{-6}$; δEu 值为 0.73~1.08, 整体表现为较弱的 Eu 负异常或无异常; 其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 3.58~4.76, 在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图解上呈弱右倾型(图 6)。微量元素中大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr 相对富集, 高场强元素 Th、Nb、Ta、Ti、P 相对亏损, Sr 表现为明显的正异常, Nb、Ta、Ti 表现为较强负异常(图 6)。

6 讨论

6.1 矿体年龄及地质意义

东准噶尔地区在古生代期间岩浆活动强烈而频繁, 大范围的板块聚合作用在不同地质历史时期形成了一系列蛇绿岩带及岛弧岩浆岩带(Xiao *et al.*, 2004)。东准噶尔岛弧岩浆岩带上, 已经发现了一系列的晚古生代斑岩铜矿床, 如~380 Ma 哈腊苏斑岩铜金矿床(张招崇等, 2006)、~390 Ma 的卡拉先格爾斑岩铜矿床(相鹏等, 2009)、~410 Ma 的和赛尔斑岩铜矿床(杜世俊等, 2010)、~410 Ma 的蒙西斑岩铜矿床(屈讯等, 2009)、~337 Ma 的桑南斑岩铜矿床(Xu *et al.*, 2017)、~410 Ma 的拉伊克勒克斑岩铜矿床(李高峰等, 2018)和 354 Ma 的绿石沟斑岩铜矿(赵建新等, 2017)等, 说明该地区斑岩成矿作用时间长, 其中早泥盆世以铜钼矿化为主, 而中晚泥盆世则变为斑岩铜(金)矿化。根据前人资料, 坝西铜矿存在两期中酸性侵入体, 早期岩体为志留纪花岗闪长岩和二长花岗岩, 晚期岩体为早石炭世石英闪长岩、石英二长闪长岩和闪长玢岩脉, 与铜矿化密切相关。石英闪长岩与石英二长闪长岩呈过渡关系, 前者为主体, 分布在中心, 后者作为边缘相出现, 本次研究揭示石英闪长岩的锆石 U-Pb 平均年

龄为 $345.7 \pm 3.0 \text{ Ma}$ (MSWD=0.40), 因此推测成矿时代应为早石炭世。岩浆作用和成矿作用持续时间长的特点和中亚成矿域一些大型矿集区相似, 如乌兹别克斯坦的 Almalyk 矿集区内分布有 Kalmakyr、Dalneye、Sarcheku 和 Kyzata 等 4 个超大型斑岩铜矿床, 成矿作用从中泥盆世一直到晚石炭世(薛春纪等, 2014; Cheng *et al.*, 2018)。南蒙古的 Oyu Tolgoi 斑岩铜金矿床是亚洲最大的斑岩铜矿床, 其斑岩锆石年龄为 374~334 Ma(陈正等, 2016; Wainwright *et al.*, 2017)。这些都说明, 坝西斑岩铜矿所在的东准噶尔古生代岛弧带具有很好的斑岩铜矿成矿背景。

6.2 岩石成因

矿区早石炭世石英闪长岩和石英二长闪长岩的岩石组合、低的 SiO₂ 含量(58.97%~64.89%)以及存在原生角闪石表明其属于 I 型花岗岩类。微量元素中 Sr 含量为 $418.00 \times 10^{-6} \sim 556.00 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $17.40 \times 10^{-6} \sim 21.00 \times 10^{-6}$, Sr/Y 值变化于 22.72~28.22, 与区域上具有埃达克质地球化学特征的侵入岩体有明显区别(杜世俊等, 2010; 王金荣等, 2013), 表现为典型的岛弧环境成因特征(图 7)。

锆石 Lu-Hf 同位素分析结果, 其 $\varepsilon \text{Hf}(t)$ 值为 +13.66~+15.56, 两阶段模式年龄值变化于 499~353 Ma 之间, 暗示岩浆起源于亏损地幔或由幔源物质分异产生的新生地壳(Peter *et al.*, 2003)。此外, 矿区石英闪长岩中含有大量同生微细粒暗色闪长质包体(MME), 椭圆状到团斑状, 微细粒结构, 这种 MME 通常被认为是幔源岩浆的加入。另外, 石英闪长岩属于中性岩类, 其中的斜长石一般是中长石, 而石英闪长岩中的斜长石是拉长石, 并且拉长石通常是基性岩浆结晶的产物, 所以这也说明可能有幔源岩浆的加入。因此, 综合考虑这些特征, 石英闪长岩可能是幔源基性岩浆和新生地壳熔体混合形成的。

表 4 角闪石电子探针分析结果 ($w_b/\%$) 及特征参数
Table 4 Electron microprobe analyses ($w_b/\%$) of amphibole and some parameters

样品号 序号	ZK2901-55		ZK3702-2	ZK2901-37	ZK2902-128			ZK2902-93			ZK2902-136			ZK2902-92		ZK2902-115	
	1	2	1	1	1	2	3	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2
SiO ₂	49.60	49.90	49.50	51.24	50.63	53.79	53.31	52.29	50.29	51.29	49.05	50.32	53.04	54.12	54.69	53.37	
TiO ₂	1.40	1.18	1.54	0.97	0.90	0.51	0.89	1.10	0.79	0.96	0.96	0.70	0.66	0.68	0.39	0.23	
Al ₂ O ₃	4.76	4.24	5.38	3.99	3.60	1.95	2.57	3.15	3.92	3.72	5.11	3.94	2.15	2.31	2.06	2.37	
FeO	12.11	12.35	10.70	10.32	13.06	10.33	9.34	11.50	15.31	12.20	14.38	15.03	11.42	9.71	7.90	12.40	
MnO	0.75	0.94	0.53	1.27	0.40	0.46	0.54	0.62	0.73	0.40	0.50	0.50	0.56	0.63	0.56	0.62	
MgO	15.42	15.16	16.08	16.71	15.25	17.74	17.93	16.59	13.75	15.93	14.27	14.09	16.47	17.94	18.88	16.31	
CaO	11.06	10.95	11.42	11.10	11.06	11.56	11.46	10.83	10.51	11.29	11.06	10.56	11.44	11.81	12.02	11.59	
Na ₂ O	1.49	1.47	1.49	1.37	1.48	0.82	0.57	0.97	0.96	1.00	1.38	1.08	0.68	0.72	0.91	0.81	
K ₂ O	0.49	0.36	0.52	0.22	0.45	0.17	0.20	0.27	0.33	0.41	0.39	0.32	0.19	0.25	0.12	0.13	
Si	7.16	7.25	7.12	7.30	7.35	7.61	7.53	7.41	7.31	7.35	7.12	7.31	7.61	7.59	7.67	7.58	
Ti	0.15	0.13	0.17	0.10	0.10	0.05	0.10	0.12	0.09	0.10	0.11	0.08	0.07	0.07	0.04	0.03	
Al	0.81	0.73	0.91	0.67	0.62	0.33	0.43	0.53	0.67	0.63	0.88	0.68	0.36	0.38	0.34	0.40	
Fe	1.46	1.50	1.29	1.23	1.59	1.22	1.10	1.36	1.86	1.46	1.75	1.83	1.37	1.14	0.93	1.47	
Mn	0.09	0.12	0.07	0.15	0.05	0.05	0.07	0.07	0.09	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	
Mg	3.32	3.28	3.45	3.55	3.30	3.74	3.78	3.51	2.98	3.40	3.09	3.05	3.52	3.75	3.95	3.45	
Ca	1.71	1.70	1.76	1.69	1.72	1.75	1.74	1.65	1.64	1.73	1.72	1.64	1.76	1.77	1.81	1.76	
Na	0.42	0.41	0.42	0.38	0.42	0.23	0.16	0.27	0.27	0.28	0.39	0.30	0.19	0.20	0.25	0.22	
K	0.09	0.07	0.10	0.04	0.08	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.07	0.06	0.04	0.05	0.02	0.02	
Si/(Si+Ti+Al)	0.88	0.89	0.87	0.90	0.91	0.95	0.93	0.92	0.91	0.91	0.88	0.91	0.95	0.94	0.95	0.95	
<i>t</i> /°C	856	848	814	908	727	673	697	753	749	727	752	704	676	701	707	674	
<i>p</i> /MPa	134.5	123.9	102.8	166.9	58.8	28.6	30.6	53.3	65.5	51.8	75.4	51.3	29.0	33.9	34.9	31.4	
△NNO	2.29	2.10	2.12	3.27	1.24	1.11	0.84	0.84	0.01	1.08	0.54	-0.22	0.57	1.54	2.31	0.59	
H ₂ O _{inelt}	3.94	3.89	4.06	3.69	4.19	3.51	3.18	3.36	4.05	3.91	4.64	4.29	3.42	3.40	3.51	3.84	

表 5 石英闪长岩主要元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果
 Table 5 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) analyses of quartz diorite

样品	ZK3702-2	ZK1701-8	ZK2902-60	ZK2902-68	ZK2901-46	ZK2902-46
SiO ₂	63.23	63.18	63.75	64.89	61.86	58.97
TiO ₂	0.40	0.46	0.46	0.45	0.46	0.69
Al ₂ O ₃	19.48	17.82	16.50	17.73	17.53	18.15
Fe ₂ O ₃	2.66	1.34	3.81	1.15	2.89	4.05
MnO	0.16	0.14	0.07	0.05	0.09	0.30
MgO	2.10	1.38	1.55	1.38	0.89	2.57
CaO	5.16	4.29	2.21	3.73	6.72	5.25
Na ₂ O	4.28	4.73	4.78	4.76	5.22	5.04
K ₂ O	0.67	1.97	1.82	1.44	0.64	0.98
P ₂ O ₅	0.14	0.17	0.16	0.17	0.16	0.16
LOI	1.20	1.43	2.48	1.18	2.34	0.80
Total	101.87	99.51	98.22	99.57	99.69	99.96
FeO	2.39	2.60	0.63	2.64	0.95	3.00
TFeO	4.78	3.81	4.06	3.67	3.52	6.64
A/CNK	1.09	0.97	1.14	1.05	0.79	0.92
Mg [#]	0.61	0.49	0.81	0.48	0.63	0.60
σ	1.21	2.22	2.10	1.76	1.82	2.27
Sc	13.00	9.38	9.40	9.69	7.63	17.30
V	112.00	60.80	68.80	65.30	69.00	170.00
Cr	4.69	2.28	2.93	2.53	2.17	3.00
Co	12.60	7.14	9.82	4.52	6.77	17.00
Ni	8.88	4.61	3.96	4.12	6.10	7.53
Zn	31.40	51.70	47.50	23.80	21.40	88.10
Ga	18.00	17.20	14.00	16.90	21.50	18.00
Rb	15.80	30.80	55.10	40.50	10.60	14.40
Sr	513.00	556.00	418.00	501.00	431.00	495.00
Y	18.40	19.70	18.40	18.30	17.40	21.00
Zr	155.00	158.00	144.00	162.00	143.00	127.00
Nb	3.27	3.83	3.73	3.79	3.57	3.26
Cs	0.34	0.89	1.99	1.26	0.41	0.50
Ba	463.00	662.00	281.00	503.00	114.00	443.00
Hf	3.92	4.40	4.16	4.48	4.23	3.52
Ta	0.32	0.33	0.32	0.30	0.30	0.31
Pb	4.21	7.22	13.80	5.51	8.16	4.90
Th	2.07	2.79	2.23	2.34	2.39	2.13
U	0.64	1.00	0.91	0.91	0.94	0.86
La	12.10	14.70	13.00	14.50	14.20	13.00
Ce	24.00	29.90	26.00	30.00	27.40	26.80
Pr	3.22	3.80	3.44	3.87	3.58	3.66
Nd	13.90	15.90	14.50	16.50	14.60	16.40
Sm	3.10	3.70	2.98	3.67	3.13	3.83
Eu	1.10	1.02	0.71	1.06	0.98	1.10
Gd	3.07	3.34	2.92	3.08	2.97	3.61
Tb	0.53	0.55	0.55	0.59	0.51	0.66
Dy	3.06	3.18	3.26	3.22	2.83	3.74
Ho	0.64	0.66	0.70	0.65	0.60	0.75
Er	1.77	1.97	2.05	1.88	1.73	2.18
Tm	0.28	0.32	0.32	0.30	0.31	0.35
Yb	2.08	2.17	2.40	2.17	2.01	2.45
Lu	0.32	0.32	0.36	0.33	0.29	0.36
ΣREE	69.17	81.53	73.19	81.82	75.14	78.89
(La/Yb) _N	3.92	4.57	3.65	4.50	4.76	3.58
δEu	1.08	0.87	0.73	0.94	0.97	0.89

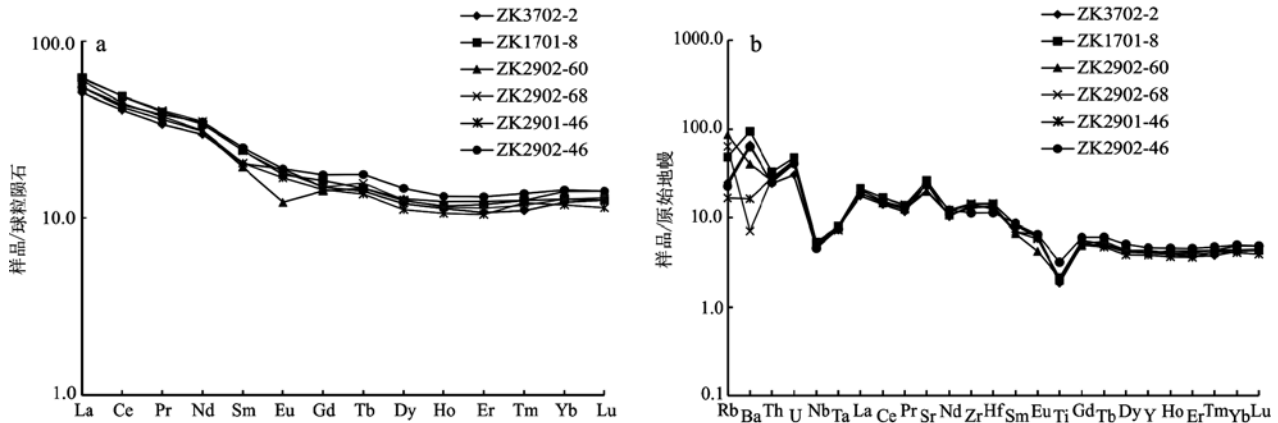


图6 石英闪长岩和石英二长闪长岩稀土元素球粒陨石标准化(a)与微量元素原始地幔标准化曲线图(b) (球粒陨石和原始地幔标准化数据来自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized incompatible element patterns (b) (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

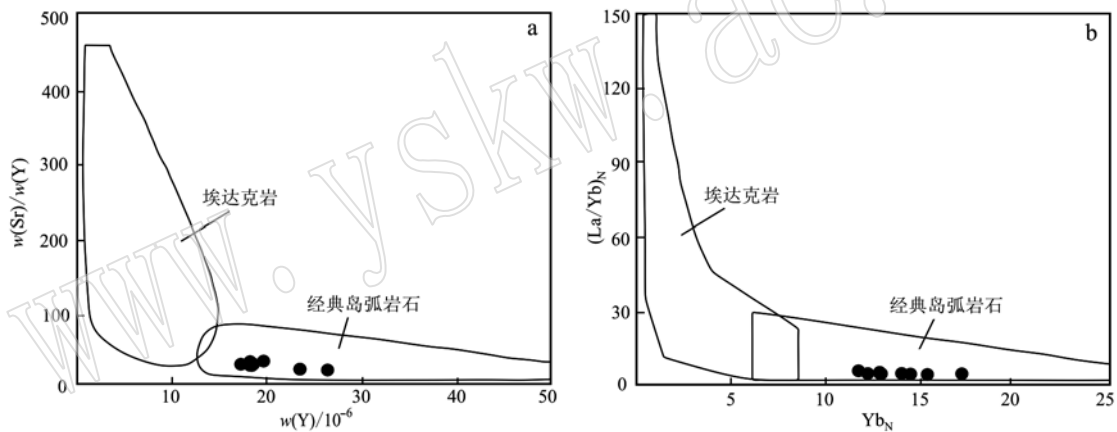


图7 石英闪长岩和石英二长闪长岩的 $\text{Sr/Y} - \text{Y}$ (a, 底图据 Martin, 1999) 和 $(\text{La/Yb})_N - \text{Yb}_N$ 图解 (b, 底图据 Drummond and Defant, 1990)

Fig. 7 $\text{Sr/Y} - \text{Y}$ diagram (a, after Martin, 1999) and $(\text{La/Yb})_N - \text{Yb}_N$ diagrams (b, after Drummond and Defant, 1990) of quartz diorite and quartz monzodiorite

6.3 斑岩铜矿成矿潜力分析

要分析斑岩铜矿的成矿潜力,首先要从地质背景和成矿环境进行分析,即是否具备斑岩铜矿的有利的斑岩铜矿背景,其次是斑岩岩浆是否有利于斑岩铜矿形成的物理化学条件。

对于斑岩铜矿而言,其最有利的背景是俯冲的岩浆弧,典型的如安第斯山和太平洋岛弧,全球前20名巨型斑岩铜矿均形成于这样的背景,包括中亚成矿域的乌兹别克斯坦的 Kalmakyr 和蒙古的 Oyu Tolgoi;其次是大陆碰撞造山带,如青藏高原的冈底斯带。弧环境中形成的含矿钙碱性岩浆最早被认为是

俯冲的大洋板片直接熔融的产物 (Sillitoe, 1972), 但后来的研究表明,除少数埃达克质岩浆为年轻大洋板片直接熔融形成外 (如 Defant and Drummond, 1990; Peacock *et al.*, 1994; Martin, 1999), 绝大多数的钙碱性岩浆是由大洋板块沿毕尼奥夫俯冲带到达深处后,发生脱水,使上地幔发生交代,产生含水的地幔部分熔融形成的。这种钙碱性玄武质岩浆通常在下地壳经历 MASH 过程 (Hildreth and Moorbath, 1988), 形成原始的含矿岛弧岩浆 (Peacock, 1993; Arculus, 1994; Richards, 2003, 2005), 其特点是富水,而且具有较高的氧逸度 (Richards, 2003), 因为

在高氧逸度条件下,S主要以硫酸盐的形式溶解于岩浆之中,从而导致Cu、Mo、Au等元素不至于在早期和S结合形成硫化物而分散,可以更好地在晚期的硅酸盐熔浆中富集(Richards *et al.*, 1991; Richards, 1995)。

前已述及,研究区与成矿有关的石英闪长岩地球化学特征上与埃达克岩明显不同,说明其不是俯冲的大洋板块部分熔融形成的。其所含的MME包体、石英闪长岩中的斜长石是拉长石以及正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都暗示与成矿有关的石英闪长岩起源于幔源的基性岩浆与新生地壳部分熔融的岩浆混合的产物,这一点与传统的斑岩铜矿成矿背景一致。

过去的大量研究表明,要形成斑岩铜矿,与成矿有关的斑岩有利于成矿的条件是:①源区具有高的铜含量,即岩浆岩是Cu的主要来源,所以岩浆岩的源区应该有高的Cu含量;②高的氧逸度,硫是变价元素,在高的氧逸度条件下硫以+6价硫酸盐的形式溶解于岩浆中,而在还原条件下是以硫化物的形式结晶沉淀而在早期阶段分散;③高的水含量,斑岩矿床是在热液阶段成矿,所以要形成足够多的岩浆热液流体,岩浆中的水要足够的高(Richards *et al.*, 1991, 1995);④浅侵位,流体在熔体中的溶解度与压力呈正相关,压力越高溶解度越高,所以岩浆上升到浅位时流体不饱和的岩浆由于压力的降低导致过饱和而出溶形成岩浆流体。按照上述条件,坝西石英闪长岩基本上具有以上3个有利条件:①其来自于幔源基性岩浆与新生地壳部分熔融岩浆的混合,这样的源区应该是富铜的(Sillitoe, 1972, 2010; Richards, 2005);②根据角闪石成分估算的氧逸度为 $\Delta\text{NNO}-0.22\sim\Delta\text{NNO}+3.27$,属于高的氧逸度;③根据角闪石成分估算的水含量为3.18%~4.64%。但是根据角闪石成分估算的深度大约为0.6~3.1 km,这个深度比一般的斑岩侵位深度要深。然而,角闪石是比较早的结晶矿物,所以实际侵位深度应该<3.3 km。

王斯林等(2017)对矿区进行了激发极化法、TEM视电阻率和CSAMT测深剖面等地球物理方法,结果显示矿区西北部中高阻、中高级化体、弱高磁异常,与矿区已知含矿部位物探异常基本一致,异常部位对应石英闪长岩体及矿化带侧伏延伸方向,他们推测为矿致异常引起,也同样显示出一定的找矿前景。

综上所述,无论是成矿地质背景还是与斑岩矿

床有关的石英闪长岩以及地球物理异常均显示出该区具有较好的找矿潜力。

7 结论

(1)坝西铜矿床赋矿岩体为早石炭世以石英闪长岩、石英二长闪长岩为主的小岩株和侵入其中的闪长玢岩脉,中间相的石英闪长岩锆石U-Pb加权平均年龄为 345.7 ± 3.0 Ma。矿物学和岩石学表明其属于准铝质-弱过铝质钙碱性中酸性I型花岗质岩石,其母岩浆可能为幔源的基性岩浆与新生地壳部分熔融形成的中酸性岩浆的混合,所以其构造背景应该是俯冲大洋板块脱水导致的地幔楔部分熔融再经历MASH过程,而不是直接由俯冲的热的大洋壳部分熔融的结果。

(2)根据角闪石成分计算出的压力为28.6~166.9 MPa,相当于大约0.6~3.1 km,温度673~908℃,水含量约3.18%~4.64%,氧逸度为 $\Delta\text{NNO}-0.22\sim\Delta\text{NNO}+3.27$ 。

(3)岩浆高的水含量和高的氧逸度为斑岩铜矿的形成提供了有利的条件。结合其产出的构造背景以及矿区地球物理异常,认为该区具有很好的斑岩铜矿找矿潜力。

References

- Arculus R J. 1994. Aspects of magma genesis in arcs[J]. *Lithos*, 33: 189~208.
- Chen Zheng and Li Junjian. 2016. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of granite of southwestern Oyu Tolgoi region in South Mongolia and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(4): 578~582(in Chinese with English abstract).
- Cheng Zhiguo, Zhang Zhaochong, Chai Fengmei, *et al.* 2018. Carboniferous porphyry Cu-Au deposits in the Almalyk orefield, Uzbekistan: the Sarycheku and Kalmakyr examples[J]. *International Geology Review*, 60: 1~20.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Dong Lianhui, Xu Xingwang, Qu Xun, *et al.* 2009. Tectonic setting and formation mechanism of the cricum-Junggar porphyritic copper deposit belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 713~737(in Chinese with English abstract).

- with English abstract).
- Drmond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B13): 21 503~21 521.
- Du Shijun, Qu Xun, Deng Gang, *et al.* 2010. Chronology and tectonic setting of the intrusive bodies and associated porphyry deposit in Hersai area, eastern Junggar [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10): 2 981~2 996 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jun, Zhu Mingtian, Wang Xinshui, *et al.* 2019. Large-scale porphyry-type mineralization in the Central Asian metallogenic domain: Tectonic background, fluid feature and metallogenic deep dynamic mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 93(1): 24~71 (in Chinese with English abstract).
- Hildreth W and Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98: 455~489.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposit*, 28(4): 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604 (in Chinese with English abstract).
- Li Gaofeng, Meng Guixiang, Zhang Li, *et al.* 2018. Rock-forming and ore-forming ages and geochemistry of the Layikeleke porphyry Cu (Mo) deposit in East Junggar of Xinjiang and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(6): 1 113~1 124 (in Chinese with English abstract).
- Liang Guanglin, Xu Xingwang, Gao Changrong, *et al.* 2010. Geological and geophysical characteristics and prognostic analysis of Mengxi porphyry Cu-Mo deposit, eastern Junggar [J]. *Xinjiang Geology*, 28 (4): 402~408 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianchao, Wang Ruimei, Cheng Jianxin, *et al.* 2014. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of the Ore-bearing rock in Mengxi porphyry Cu-Mo deposit[J]. *Xinjiang Geology*, 32(1): 76~81 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex. Version 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1~70.
- Mao Jingwen, Franco Pirajno, Bernd Lehmann, *et al.* 2014. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 576~584.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 46(3): 411~429.
- Peacock S M. 1993. Large-scale hydration of the lithosphere above subducting slabs[J]. *Chemical Geology*, 108: 49~59.
- Peacock S M, Rusher T and Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 224~227.
- Peter D, Kinny and Roland M. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327~341.
- Qu Xun, Xu Xingwang, Liang Guanglin, *et al.* 2009. Geological and geochemical characteristics of the Mengxi Cu-Mo deposit and its constraint to tectonic setting of the Qionghaba magmatic arc in eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 765~776 (in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 1995. Alkaline-type epithermal gold deposits-a review[J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 23: 367~400.
- Richards J P. 2005. Cumulative factors in the generation of giant Calc-alkaline porphyry Cu deposits[A]. Porter T M. *Super-Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*[C]. PGC Publishing, Adelaide: 7~25.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Economic Geology*, 98: 1 515~1 533.
- Richards J P, McCulloch M T, Chappell B W, *et al.* 1991. Sources of metals in the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: Evidence from alteration, isotope, and noble metal geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 565~580.
- Ridolfi F and Renzulli A. 2012. Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: Thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1 130°C and 2. 2 GPa[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163: 877~895.
- Seltmann R and Porter T M. 2005. The Porphyry Cu-Au/Mo Deposits of Central Eurasia: 1. Tectonic, Geologic and Metallogenic Setting, and Significant Deposits[J]. *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*, 2: 467~512.
- Shen Ping and Pan Hongdi. 2015. Characteristics of the porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 315~332 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 184~197.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*,

- 105: 3~14.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geology Society*, 42(1): 313~345.
- Wainwright A J, Tosdal, Richard M, *et al.* 2017. Exhumation and preservation of porphyry Cu-Au deposits at Oyu Tolgoi, South Gobi Region, Mongolia[J]. *Economic Geology*, 112(3): 591~601.
- Wang Jinrong, Jia Zhilei, Li Taide, *et al.* 2013. Discovery of Early Devonian adakite in West Junggar, Xinjiang: Implications for geotectonics and Cu mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 840~852(in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Nie Fengjun and Liu Yong. 2010. Geological and geochemical characteristics and geological implications of the Mengxi porphyry copper-molybdenum deposit in East Junggar region[J]. *Geology in China*, 37(4): 1151~1161(in Chinese with English abstract).
- Wang Silin, Guo Yan and Gao Ke. 2018. Geological characteristics and metallogenic prospect of Baxi copper deposit in Yiwu County, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology of Nonferrous Metals*, 47(1): 22~24(in Chinese with English abstract).
- Wang Silin, Qu Shuanzhu, Xu Minshan, *et al.* 2017. Geological and geophysical characteristics and prospecting direction of Baxi copper mine[J]. *Xinjiang Geology*, 25(2): 201~206(in Chinese with English abstract).
- Xiang Peng, Zhang Lianchang, Wu Huaying, *et al.* 2009. Ages of the zircons from ore-bearing porphyries in II-III ore area of Kalaxianger porphyry copper ore belt in Qinghe, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1474~1483(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Badararch G, *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of central Asia[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 161: 339~342.
- Xu Xingwang, Li Hao, Peters S G, *et al.* 2017. Cu-rich porphyry magmas produced by fractional crystallization of oxidized fertile basaltic magmas (Sangnan, East Junggar, PR China)[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 296~315.
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Mo Xuanxue, *et al.* 2014. Tectonic-Metallogenic Evolution of Western Tianshan Giant Au-Cu-Zn-Pb Metallogenic Belt and Prospect Orientation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2490~2531(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Zhanfeng, Wu Ganguo, *et al.* 2010. The multiperiodic superimposed porphyry copper mineralization in Central Asian Tectonic Region: A case study of geology, geochemistry and chronology of Halasu copper deposit, Southeastern Altai, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 53~82(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Yan Shenghao, Liu Guoren, *et al.* 2010. Geological characteristics and metallogenesis of porphyry copper deposits in Junggar, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 29(6): 956~971(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Liang Guanglin, Qu Xun, *et al.* 2010a. Evidence of U-Pb age and Hf isotope of zircons for Early Paleozoic magmatism in the Qionghaba arc, East Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2389~2398(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Liang Guanglin, Wu Qianyi, *et al.* 2010b. Characteristics and formation mechanism of the veins in Mengxi porphyry Cu-Mo deposit, eastern Junggar, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2997~3006(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bolin, *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb zircon dating of subduction granites in northern East Junggar, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(13): 1565~1574(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bolin, *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for subduction-related granitic rocks in the northern part of east Junggar, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(8): 952~962.
- Zhao Jianxin, Tong Ying, Meng Guixiang, *et al.* 2017. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Lüshigou high Ba-Sr quartz-monzonite in East Junggar, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(5): 743~754(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, He Guoqi and An Fang. 2007. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1167~1177(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈正, 李俊建. 2016. 南蒙古地区西南欧玉花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 35(4): 578~582.
- 董连慧, 徐兴旺, 屈迅, 等. 2009. 初论环准噶尔斑岩铜矿带的地质构造背景与形成机制[J]. *岩石学报*, 25(4): 713~737.
- 杜世俊, 屈迅, 邓刚, 等. 2010. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成岩成矿时代与形成的构造背景[J]. *岩石学报*, 26(10): 2981~2996.
- 高俊, 朱明田, 王信水, 等. 2019. 中亚成矿域斑岩大规模成矿特

- 征: 大地构造背景、流体作用与成矿深部动力学机制[J]. 地质学报, 93(1): 24~71.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 李高峰, 孟贵祥, 张 丽, 等. 2018. 新疆东准噶尔拉克勒克斑岩铜(钼)矿床成岩成矿年龄、地球化学特征及其意义[J]. 地质通报, 37(6): 1 113~1 124.
- 梁广林, 徐兴旺, 高长荣, 等. 2010. 蒙西斑岩铜矿地质地球物理特征及找矿潜力分析[J]. 新疆地质, 28(4): 402~408.
- 刘建朝, 王瑞美, 程建新, 等. 2014. 蒙西斑岩铜钼矿含矿岩体地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. 新疆地质, 32(1): 76~81.
- 屈 迅, 徐兴旺, 梁广林, 等. 2009. 蒙西斑岩型铜钼矿地质地球化学特征及其对东准噶尔琼河坝岩浆岛弧构造属性的制约[J]. 岩石学报, 25(4): 765~776.
- 申 萍, 潘鸿迪. 2015. 中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征[J]. 岩石学报, 31(2): 315~332.
- 王金荣, 贾志磊, 李泰德, 等. 2013. 新疆西准噶尔发现早泥盆世埃达克岩: 大地构造及成矿意义[J]. 岩石学报, 29(3): 840~852.
- 王 军, 聂凤军, 刘 勇. 2010. 东准噶尔蒙西斑岩型铜钼矿床地质地球化学特征[J]. 中国地质, 37(4): 1 151~1 161.
- 王斯林, 郭 燕, 高 科. 2018. 新疆伊吾县坝西铜矿地质特征及成矿远景分析[J]. 新疆有色金属地质, 47(1): 22~24.
- 王斯林, 屈栓柱, 徐敏山, 等. 2017. 坝西铜矿地质地球物理特征及找矿方向[J]. 新疆地质, 25(2): 201~206.
- 相 鹏, 张连昌, 吴华英, 等. 2009. 新疆青河卡拉先格尔铜矿带 II-III 矿区含矿斑岩锆石年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 25(6): 1 474~1 483.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 等. 2014. 西天山巨型金铜铅锌成矿带构造演化及找矿方向[J]. 地质学报, 88(12): 2 490~2 531.
- 薛春纪, 赵战锋, 吴淦国, 等. 2010. 中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化: 以阿尔泰山东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例[J]. 地学前缘, 17(2): 53~82.
- 杨富全, 闫升好, 刘国仁, 等. 2010. 新疆准噶尔斑岩铜矿地质特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 29(6): 956~971.
- 张 永, 梁广林, 屈文俊, 等. 2010a. 东准噶尔琼河坝岛弧早古生代岩浆活动的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 26(8): 2 389~2 398.
- 张 永, 梁广林, 吴倩怡, 等. 2010b. 东准噶尔蒙西斑岩铜钼矿床脉体特征及其形成机制[J]. 岩石学报, 26(10): 2 997~3 006.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 科学通报, 51(13): 1 565~1 574.
- 赵建新, 童 英, 孟贵祥, 等. 2017. 新疆东准噶尔绿石沟高 Ba-Sr 石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄、成因及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(5): 743~754.
- 朱永峰, 何国琦, 安 芳. 2007. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J]. 地质通报, 26(9): 1 167~1 177.