

新疆西天山艾日垦其垦铜钼矿床成矿过程 及其找矿潜力

马元, 黄河, 张招崇, 金子梁

(中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:艾日垦其垦矿床是近年发现的铜钼矿床,位于中国西天山东部,处在中亚成矿带腹地。主要赋矿岩石为二长花岗岩,可划分为钾化带、硅化带、青磐岩化带和绢英岩化带等4个明显的蚀变带,且成带状分布,主要受那拉提南缘断裂控制。本文对矿脉中钾长石和岩体中绢云母进行了年龄测试,结果显示热液作用时限为 268.35 ± 4.05 Ma,岩浆作用时限为 321.43 ± 4.24 Ma。主微量元素分析测试显示出赋矿岩体富Si($\text{SiO}_2 = 71.01\% \sim 73.94\%$),富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5.53\% \sim 7.80\%$),贫钙($\text{CaO} = 1.95\% \sim 2.93\%$),高Sr($> 417 \times 10^{-6}$),低Y($< 12.3 \times 10^{-6}$),总体上富集大离子亲石元素LILE(Ba, Th, Rb, K),亏损高场强元素HFSE(Nb, Ta, Ti),微量元素比值暗示曾发生下地壳加厚作用。流体包裹体测试结果显示出本矿床含矿脉体主要为变质流体包裹体,且近定向排列,具有低温低盐度特征,这与典型斑岩型矿床区别很大。研究认为本区在石炭纪岩浆侵入阶段并未形成矿床,但形成了铜钼等金属的预富集,二叠纪的热液作用是形成矿床的关键过程,与当时发生的韧性剪切作用关系密切,断裂为成矿热液上移提供动力和通道。

关键词:西天山,铜钼矿床,变质流体,韧性剪切带

中图分类号:P588.12;P597+.3;P618.41

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2014)01-0079-16

Ore-forming process and prospecting potential of the Airikenqiken Cu (Mo) ore district in the West Tianshan Mountains, Xinjiang

MA Yuan, HUANG He, ZHANG Zhao-chong and JIN Zi-liang

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

Abstract: Located in the eastern part of the West Tianshan Mountains, the Airikenqiken ore district, discovered in recent years as a Cu-Mo deposit, possesses an important position in the Middle Asia metallogenic belt. The main ore-hosting rock is monzogranite. The deposit possesses four banded alliterated belts, namely potassic belt, silicification belt, phyllic belt and propylitization belt, controlled mainly by fractures in the south margin of Nalati. The authors analyzed K-feldspar in ore veins and sericite in rock bodies, and the K/Ar dating results show that the age of metallogenesis is 268.35 ± 4.05 Ma and that of the mineralization is 321.43 ± 4.24 Ma. Elements analyses show that the magmatic body has high Si ($\text{SiO}_2 = 71.01\% \sim 73.94\%$), high alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5.53\% \sim 7.80\%$), low Ca ($\text{CaO} = 1.95\% \sim 2.93\%$), high Sr ($> 417 \times 10^{-6}$), and low Y ($< 12.3 \times 10^{-6}$), with the enrichment of LILE (Ba, Th, Rb, K) and depletion of HFSE (Nb, Ta, Ti), whereas trace elements characteristics imply lower-crust related genesis. In addition, fluid inclusions in this deposit are mainly directional fluid intrusions, and most of them are of metamorphism genesis. They have low-temperature and low-

收稿日期:2013-01-16;修订日期:2013-11-22

基金项目:国家科技支撑计划(2011BAB06B02-04);国家自然科学基金资助项目(40925006)

作者简介:马元(1989-),男,硕士研究生,矿物学、岩石学和矿床学专业,E-mail:ohmykps@163.com;通讯作者:张招崇(1965-),男,博士,教授,E-mail:zczhang@cugb.edu.cn

salinity characteristics, quite different from features of typical porphyry deposits. The authors hold that this district didn't form deposit during magmatic intrusion in Carboniferous period, but it experienced pre-enrichment of metals. Hydrothermal process in Permian period played the most important role in the formation of the ore deposit, which was closely related to the ductile shear zone in that the ductile shear process provided channel and force for the upward migrating ore-forming hydrothermal fluids.

Key words: West Tianshan Mountains; Cu-Mo deposit; metamorphic fluid; ductile shear zone

作为巨型中亚成矿带的重要组成部分,天山是寻找斑岩型铜矿的有利地区(王志良等,2006)。我国境内的西天山地区已发现了莱历斯高尔、3571 和喇嘛苏等斑岩铜矿床(张东阳等,2009,2010)。位于中国西天山东段的艾日垦其垦铜钼矿床是河南省有色金属地质矿产局第五地质大队于 2008 年发现的铜钼矿床,由于该矿床目前正在勘探勘查之中,故尚未有正式报道。本文在野外工作基础上,初步分析了本矿床岩体的地球化学、流体包裹体以及相关年代学结果,试图探讨成岩及成矿环境,为该矿床的形成提供约束条件,为进一步研究和今后的找矿勘查提供依据。

1 区域地质概况

艾日垦其垦矿床在大地构造上属塔里木板块塔里木北部大陆边缘巴仑台-星星峡中间地块,是塔里木板块与伊犁板块汇聚的位置(陈衍景,1996),也是古南天山洋消减的位置(左国朝等,2011)。

矿区北部为那拉提-乌瓦门韧性剪切带和准噶尔板块伊犁板块博罗科努古生代非岩浆岩型被动陆缘带,南部为萨阿尔明晚古生代褶皱带(图 1)(王新宇,2010)。区域内褶皱构造发育,主要属于中天山褶皱带巴仑台复背斜南翼,呈北西西向横贯全区。研究区主要受那拉提山南缘深大断裂,其次受那拉提山北缘深大断裂两条深大断裂控制。其中那拉提山北缘深大断裂又称中天山结晶轴南缘深大断裂;那拉提山南缘深大断裂是一条重要的俯冲缝合界线。该断裂呈近东西向延伸,该断裂为一韧性断裂,沿断裂发育大规模韧性剪切带。

研究区出露的主要地层包括:元古界结晶片岩,奥陶系玄武岩等,志留系长石砂岩等,石炭系砾岩等,二叠系砾岩等,第三系和第四系沉积层。其中除二叠系到第四系为陆相沉积外,其余均为海相沉积,中生代以前的地层均受到不同程度的变质作用。

区内岩浆活动强烈,侵入岩特别发育,出露面积

占基岩的 50% 左右。都分布在各个构造断裂带附近,所有岩体的长轴方向与区域构造线方向一致。岩性由老到新有由基性、中性到酸性的变化趋势,而以酸性的中深成侵入岩为主。侵入时代限于加里东晚期-华力西构造旋回的早-晚期,以早期为最强烈。各类岩体对矿化的控制作用不同,如产于下石炭统地层与花岗闪长岩、闪长岩接触带附近铜多金属矿化;产于华力西早期花岗岩、石英闪长岩裂隙内的铜金钼矿化等。与本文所研究的艾日垦其垦铜钼矿床具有成因联系的岩体主要是海西早期的二长花岗岩(图 1)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区、矿体地质特征

矿区地层分区属中天山分区巴仑台小区,出露的地层较为简单,主要为中元古界星星峡组地层,该地层主要出露于矿区南部,主要岩性为黑云石英片岩,灰绿-黑色,鳞片粒状变晶结构,片状构造,主要矿物为黑云母,沿片理定向分布。矿区内岩浆岩较为发育,约占矿区面积的 95%,大部分为海西早期侵入的二长花岗岩,其次为海西期闪长玢岩和石英闪长岩。区内矿体以细脉状、透镜状产于硅化较强的二长花岗岩裂隙及石英脉裂隙中,黄铁矿化、黄铜矿化、孔雀石化呈星点状分布。矿区发现含铜钼矿(化)体 7 条(图 1),其中 K1、K2 矿体是区内的主要矿体,以下仅简要介绍两个主矿体。

K1 铜金矿体:位于矿区中部,地表为物理风化后的矿化二长花岗岩及石英细脉碎块。矿体赋存于石英脉裂隙及硅化较强的二长花岗岩裂隙内,由 K1-I、K1-II、K1-III 三条矿体组成,主要呈细脉状、透镜状产出,具有分支复合现象,矿体产状 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ / $70^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。已控制矿体长度约 200 m,最厚可达 9.66 m,平均厚度 2.20 m,铜品位 0.22% ~ 0.35%,平均 0.23%,矿体围岩为二长花岗岩,矿体及近矿围岩网脉状硅化、钾化较强,向两侧逐渐减弱。地表矿

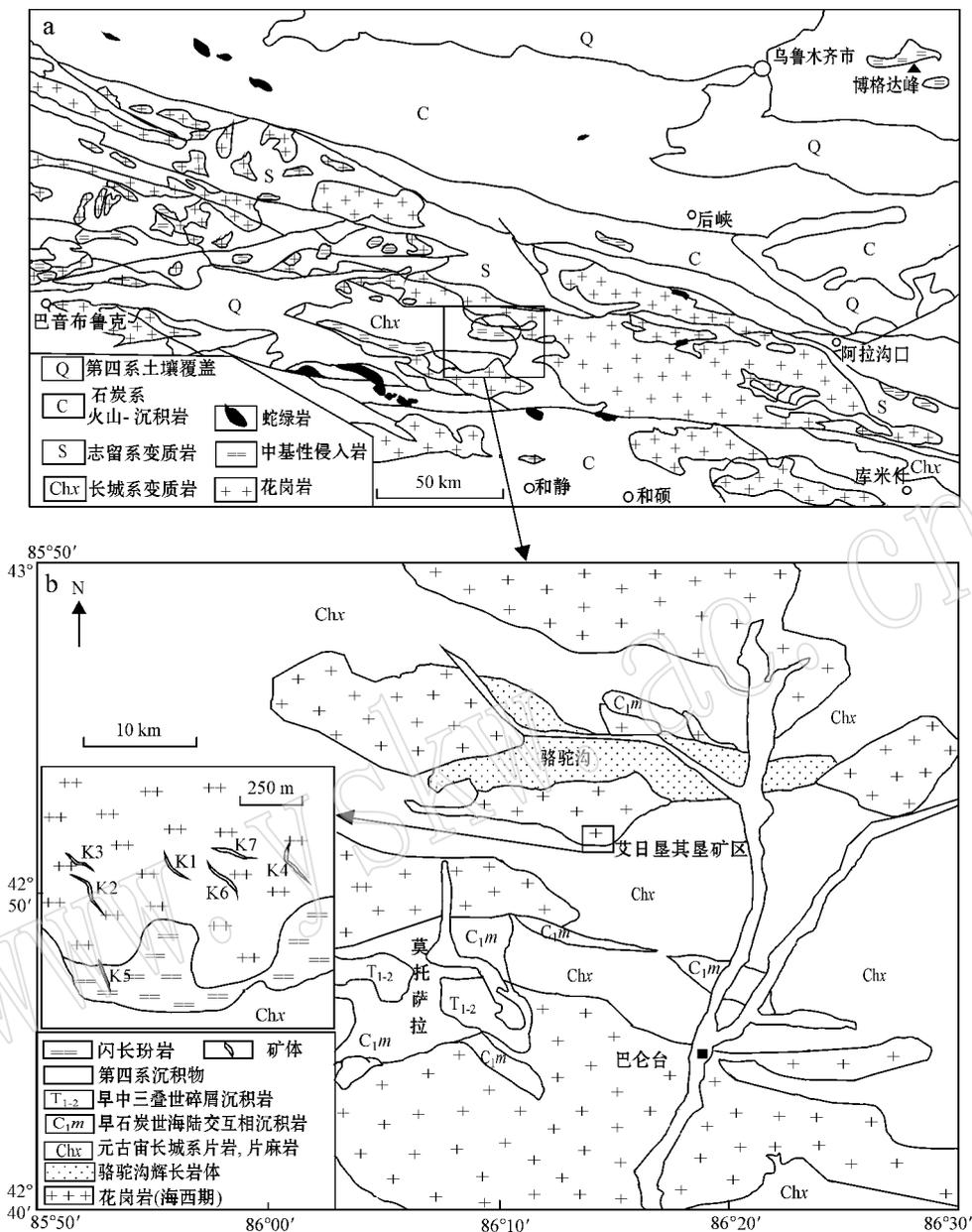


图 1 新疆中天山地区的地质-构造简图(a)和艾日垦其垦岩体(b, 据朱永峰等, 2006b)

Fig. 1 Sketch geological map of Baluntai region(a) and the Airikenqiken ore district (b, modified after Zhu Yongfeng et al., 2006b)

化以褐铁矿化、硅化、黄铜矿化为主,中浅部以星点状、细脉状、团块状黄铜矿化、黄铁矿化、辉钼矿化、褐铁矿化为主,孔雀石化次之。围岩蚀变主要为硅化、钾化、白云母化、绿泥石化、绢云母化。矿石结构有自形、半自形粒状结构、交代残余结构等,构造主要有细脉状构造、块状构造等。

K2铜金矿体:位于矿区中西部,地表为物理风化后的矿化二长花岗岩及矿化石英细脉碎块,矿体赋

存于石英脉裂隙及硅化较强的二长花岗岩裂隙内,主要呈细脉状、透镜状产出,具有膨大收缩现象,矿体产状 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}/70^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。矿体沿走向上基本连续,长度约450 m。Cu平均品位0.21%。矿体有益组分为Au,品位 $0.01\times 10^{-6}\sim 23.75\times 10^{-6}$ 。矿石结构为自形、半自形粒状结构,构造主要为细脉状构造。

2.2 岩体岩相学特征

与矿床具有成因联系的岩体位于研究区中部,

整个岩体出露长约 18 km, 宽约 5.5 km, 矿床矿化岩体面积约 4.5 km², 分布明显受断裂构造控制, 长轴近东西走向, 岩石较破碎, 节理较为发育, 岩性主要为二长花岗岩。铜(钼)矿石以细脉浸染状为主, 少量为块状、带状等, 整体品位较低(侯增谦等, 2007)。

成矿岩体中主要矿物为斜长石(约 30%~40%)、钾长石(20%~35%)、石英(15%~30%), 次要矿物为黑云母(5%~10%), 副矿物有金红石、磷灰石等。样品呈中细粒不等粒结构, 块状构造, 深部粒度较浅层更细, 并出现少量花岗闪长岩和闪长玢岩脉。石英多为他形粒状和脉状产出, 颗粒 0.05 mm×0.06 mm~2.1 mm×3.2 mm, 平均约为 1.1 mm×1.6 mm, 石英脉体宽度范围在 1~100 mm。部分硅化区域可见较明显的溶蚀现象, 偶见晶洞构造(图 2b), 可视为岩浆-热液转换标志。斜长石多数为自形半自形柱状、板状, 颗粒 0.06 mm×1 mm~3.1 mm×4.4 mm, 平均约为 1.6 mm×3.2 mm, 可见聚片双晶、环带构造, 局部发育绢云母化。钾长石常与斜长石、黑云母共生, 多为柱状, 部分呈板状。颗粒 0.05 mm×0.05 mm~2.2 mm×3.2 mm, 平均约为 1.3 mm×1.8 mm。黑云母呈片状, 黑色或黑

褐色, 常见绿泥石化, 主要分布于岩体和钾长石英脉中, 颗粒 0.05 mm×0.05 mm~2 mm×2.4 mm, 平均约为 1.1 mm×1.3 mm。

2.3 围岩蚀变

岩体蚀变分带明显, 矿体由内到外、由深及浅大致可分为钾化、硅化、绢英岩化和青磐岩化等蚀变类型, 呈带状分布。岩体普遍具有孔雀石化、褐铁矿化、黄铁矿化、黄铜矿化及辉钼矿化, 这些蚀变作用主要表现为面型蚀变和线形蚀变两种。长石普遍蚀变成绢云母, 已经看不到长石的双晶, 仅仅保留了长石的形态。

矿体赋存于岩体内部及与围岩的接触带上, 地表岩石风化严重。尽管各带有相互叠加的现象, 但是根据蚀变分带的矿物种类, 分布特点及构造位置的不同, 大致可分为 4 个蚀变带:

2.3.1 钾化带

钾化在地表仅稀疏分布, 钻孔资料揭示该类蚀变向深部呈逐渐增多的趋势。大量含铜(钼)钾长石脉和钾长石英细脉在钾化带构成不规则面状的钾长石化带。钾长石脉和钾长石英脉常为细微矿物集合体, 多呈浸染状(图 2f), 在地表钾长石常被绿泥石取

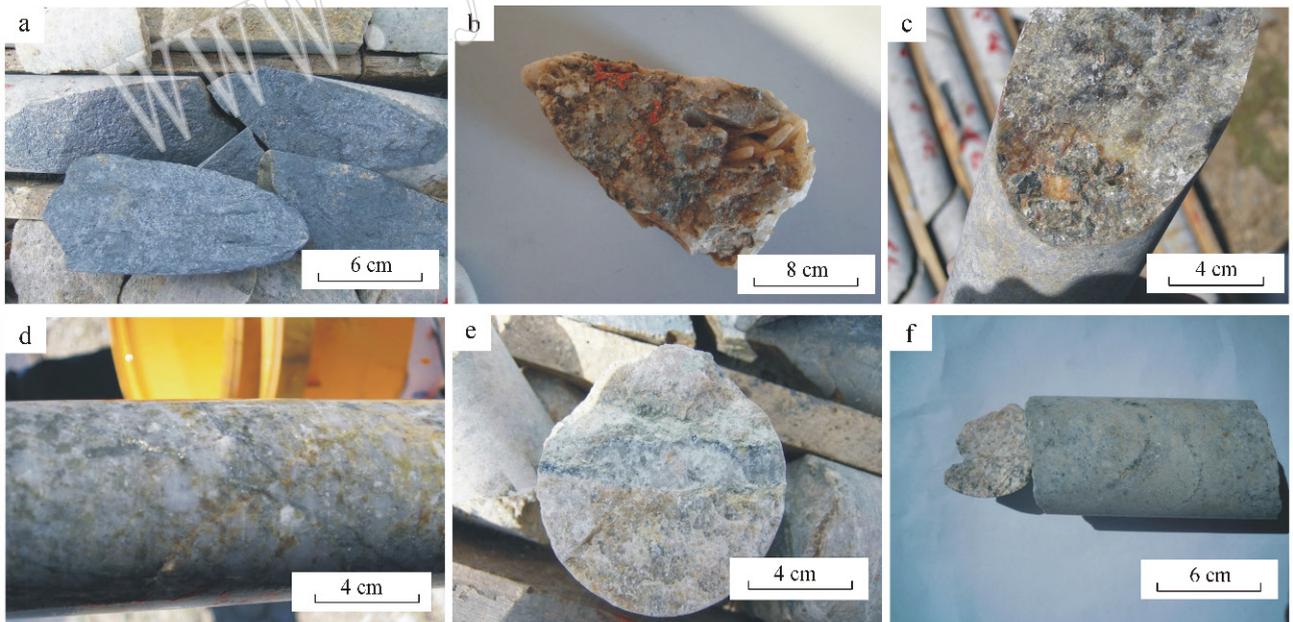


图 2 艾日垦其垦部分脉体构造手标本照片

Fig. 2 Photograph of veins in ores from the Airikenqiken porphyry deposit

a—含辉钼矿石英细脉; b—岩体石英脉中的晶洞构造; c—浸染状黄铁矿; d—斑状岩石中细脉浸染状黄铜矿和辉钼矿;
e—硅化带中含辉钼矿石英脉; f—钾化带中含黄铜矿细脉

a—quartz veins containing molybdenite; b—geode in quartz veins of rock body; c—impregnated pyrite; d—veinlet disseminated chalcopyrite and molybdenite in porphyritic rocks; e—veinlets containing molybdenite in silicified belt; f—thin veins containing chalcopyrite in potash feldspar zone

代,向深处逐渐发育钾长石英脉和钾长石脉,且常伴有黑云母化。钾化带是矿床的主要赋矿带,产出了大部分黄铜矿,黄铜矿多呈细脉状和团块状。

2.3.2 硅化带

尽管岩体表面风化严重,但地表仍可见原岩的残留团块和石英脉,这也暗示了大规模含矿热流体对围岩的交代作用。硅化多体现为原生斜长石被不规则石英所蚕食交代,次生石英呈细小他形粒状在其他矿物粒间。硅化多在深部,浅层发育石英细脉,脉体向深处加粗,并呈 $50^{\circ}\sim 87^{\circ}$ 高角度产出,携带大量黄铁矿、黄铜矿和毒砂。部分钻孔中石英脉中发育辉钼矿(图 2e)及辉钼矿和黄铜矿共生脉,是辉钼矿的主要载体。

2.3.3 绢英岩化带

绢英岩化带发育大量白云母、绢云母,主要发生在地表和硅化发育的矿体浅层,轻度风化,并常伴有黏土化、碳酸盐化和黄铁矿化。常呈残片状存在于硅化带和钾化带的内部,多呈青灰色。

2.3.4 青磐岩化带

青灰色、墨绿色为主,分布广泛,多见绿泥石化与碳酸盐化,呈细脉浸染状分布于岩石中。与青磐岩化密切相关的有褐铁矿化、黄铁矿化和绿泥石化,黄铁矿呈星点状、浸染状和细脉状赋存于蚀变带中。

2.4 成矿期次划分

根据矿物共生组合特征、各类矿石的产出关系、野外和镜下观察划分艾日垦其垦铜钼矿床成矿期次为岩浆矿化期、热液矿化期和表生期。

2.4.1 岩浆矿化期

含铜钼岩浆侵入,形成普遍矿化(贫矿石),主要形成石英脉型和细脉浸染型的辉钼矿和黄铜矿,并形成少量在岩体中呈团块状、星点块状黄铜矿和黄铁矿(图 2c)。形成了艾日垦其垦铜钼矿约 10% 的经济矿体和少量蚀变(如青磐岩化)。

2.4.2 热液矿化期

热液成矿期形成了艾日垦其垦矿床约 90% 的经济矿体和主要的四类蚀变分带。岩体和外围地段发育有丰富的网脉状构造,根据不同脉体的相互穿插关系,厘定出流体演化对应的三期共五个成矿阶段,从早到晚依次为:

(1) 第一期热液转换期

石英-钾长石/黑云母-少量辉钼矿±黄铁矿阶段(P1):热液期早阶段硅质富碱富水高温流体形成石英-钾长石/黑云母矿物组合,呈浸染状或脉状,在

岩体深部位置钾化较为发育。此阶段形成的金属矿物主要是辉钼矿和黄铁矿,呈稀疏浸染状分散于岩体中。

(2) 第二期石英-金属硫化物热液期

石英辉钼矿±黄铁矿阶段(P2):以石英脉中富含辉钼矿为特征,多数脉仅见单一的辉钼矿,部分脉体中见少量共生黄铁矿。辉钼矿呈片状、鳞片状集合体分布于石英脉壁两侧(图 2a),粒度 $0.2\sim 1\text{ mm}$ 。石英-辉钼矿脉在岩体上部 and 外围普遍发育,该阶段代表辉钼矿从流体中大规模析离的时期。

石英-多金属硫化物阶段(P3):石英脉中可见黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿和毒砂等多种金属硫化物,其中黄铜矿和辉钼矿常作为共生组合矿物出现,黄铁矿和毒砂在局部地段呈团块状产出,该阶段是多金属硫化物沉淀的主要时期。

(3) 第三期热液演化晚期

石英-硫化物阶段(P4):石英脉中仅见少量黄铁矿,有的为纯净石英脉,明显穿切了 H1-H3 脉体,代表大部分金属充分沉淀后的流体演化阶段。

石英-绿泥石/方解石-少量黄铁矿阶段(P5):分布范围较广,几乎穿切了区内所有早阶段脉体,脉体中含较多的绿泥石或碳酸盐矿物,金属矿物仅见黄铁矿,指示成矿晚期或后期。

由以上不同脉体穿插关系及矿物的生成顺序,推测流体具有从早阶段高温富碱(K、Na)向晚阶段中低温富钙变化的特征。蚀变和矿化伴随在流体演化的整个过程,钾化主要发生在 P1 阶段,硅化贯穿 P1~P5 整个流体演化过程,绢英岩化发生在 P3~P5 阶段,泥化在最晚期进行,其中 P2~P3 阶段是主要成矿时期。

2.4.3 表生期

在主矿体形成后,岩体中的黄铜矿、黄铁矿遭到风化剥蚀,经过淋滤作用渗透到下部岩体,产生次生硫化物富集作用,表现为孔雀石化和褐铁矿化,以浸染状分布于脉系及裂隙中,产出极少量有用矿质富集。

3 样品选择与分析测试方法

为了研究与确定艾日垦其垦斑岩铜矿和该地区花岗岩形成的构造背景及成因联系,在艾日垦其垦地区系统的采集了各蚀变分带的典型岩石、无矿石英脉、含矿的石英脉和钾长石英脉样品,在对样品进行详细手标本和偏光、反光显微镜观察后,挑选较新

鲜的样品并将其粉碎成粉末和制成包裹体片进行分析。K/Ar 法年龄测定在中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心完成,使用仪器为 MM5400 静态真空质谱计,测试条件是将样品在 1500℃ 左右融化同时,加入准确定量的 ($^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$)_m 和 ($^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)_m, 求出样品放射性成因 ^{40}Ar 的含量,再根据样品的钾含量计算年龄;电子探针实验在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心完成,加速电压 15 kV,电流 1×10^{-8} A,束斑 1 μm ,ZAF 修正法;主量元素和微量元素测试在中国地质科学院国家测试中心进行。样品细碎至 200 目以上后进行测试。主量元素由 XRF 法测试,分析精度好于 5%,其中 FeO 含量用湿化学法测定,分析精度优于 0.5%~1%;微量元素由 ICP-MS 法测试,分析精度好于 5%~10%。流体包裹体显微测温工作在中国地质大学

(北京)流体包裹体实验室完成,测温仪器为英国产 Linkam THMGS-600 型冷热台,测温范围为 -198~+600℃。温度在 -30~30℃ 区间,测温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$;在 31~100℃ 区间,测温精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$;在 100~600℃,测温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

4 分析结果

4.1 年代学成矿期次划分

本次测试的样品是取自蚀变带中钾长石脉里的钾长石和轻度蚀变岩体中的绢云母。分析结果显示,钾长石的 K/Ar 年龄为 268.35 ± 4.05 Ma,绢云母的 K/Ar 年龄为 321.43 ± 4.24 Ma,这表明本矿床曾经受两次蚀变作用影响,可能代表了两次与成矿有关的地质作用。

表 1 K/Ar 法年龄测试结果

Table 1 Experimental results of K/Ar ages

编号	测试对象	钾含量/%	($^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$) _m	($^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$) _m	放射成因氩 ($^{40}\text{Ar}^{\text{放}}$)/g mol/g	^{40}K 含量 (^{40}K)/g mol/g	$^{40}\text{Ar}^{\text{放}}/^{40}\text{Ar}^{\text{总}}/\%$	$^{40}\text{Ar}^{\text{放}}/^{40}\text{K}$	年龄值 (Ma, 1 σ)
Y-2	绢云母	8.53	993.039 70	45.132 38	5.205E-09	2.546E-07	98.36	0.020 443 8	321.43 \pm 4.24
J-1	钾长石	7.74	845.378 97	12.500 11	3.884E-07	2.310E-07	97.30	0.016 812 2	268.35 \pm 4.05

注:常数 $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $^{40}\text{K}/\text{K} = 1.167 \times 10^{-4}$ 。

4.2 黑云母矿物学特征

用于电子探针分析的黑云母矿物是分选自表层的和深度约 100 m 的深度未蚀变样品,根据探针数据,艾日垦其垦矿区的黑云母 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 的比值变化范围较小,为 0.48~0.55,表明其未受到后期流体改造,属于原生黑云母。6 件黑云母电子探针分析结果见表 2,其中 SiO_2 含量 34.58%~35.83%,平均 35.13%;全铁 TFe 含量 2.46%~2.81%,平均 2.62%;Al 含量 3.09%~3.18%,平均 3.15%;Ti 含量 0.29%~0.37%,平均 0.32%;Mn 含量 0.09%~0.18%,平均 0.15%;Mg 含量 2.05%~2.29%,平均 2.15%;Ca 含量 0.00%~0.03%,平均 0.01%;Na 含量 0.04%~0.22%,平均 0.12%;磁铁矿的化学成分表现出 Si、Al、Ti、Fe 的含量相对较高,K、P、Ni 含量很低,大多低于检测限。

在黑云母的 Ti-Mg/(Mg+Fe) 温度估算图解(图 3)中本区岩体中黑云母结晶温度在 650~690℃ 之间。前人研究(Albuquerque, 1973; Etsuo *et al.*, 2007)指出,利用与磁铁矿和钾长石共生的黑云母的

Fe^{2+} , Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 的原子百分数可以估算黑云母结晶时的氧逸度。镜下观察表明本区黑云母与磁铁矿、钾长石等矿物共生,符合该逸度计算使用条件。依据 Wones 和 Eugster(1965)在 $p = 207.0$ MPa 条件下黑云母的 $\log f\text{O}_2 - t$ 图解(图 4,数字 0~100 为黑云母的稳定性 $100 \times \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$),并结合 Ti-Mg/(Mg+Fe) 温度图解,得出本区花岗岩的其 $f\text{O}_2$ 变化于 $10^{-15.1} \sim 10^{-12.6}$ 属于较高的氧逸度。

据丁孝石(1988)的研究,典型幔源黑云母中 $\text{Mg} > 15\%$,壳源黑云母中 $\text{Mg} < 6\%$,本文所测样品中 Mg 的含量变化在 8.90%~11.01%,平均 9.38%,具壳幔过渡特征。此外,成矿早期钾化阶段,岩浆岩的主要矿物均已结晶,黑云母中 Ti(TiO_2) 含量较高可能说明残余岩浆较富挥发分(魏斐等, 2009)。

4.3 岩石地球化学特征

根据作者采样数据及参考数据(金子梁,私人通讯),花岗岩体具有富硅($\text{SiO}_2 = 71.15\% \sim 72.63\%$)、富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5.53\% \sim 7.80\%$)、贫钙($\text{CaO} = 2.01\% \sim 2.60\%$)的特征,金子梁数据为:

表 2 黑云母电子探针成分分析结果及结构计算

$\omega_B/\%$

Table 2 Electron microprobe analyses of biotite (in percentage) and structural formula of biotite

样品号	Y-1-4	Y-2-2	J-1-4	B-10-3	B-5-1	B-2-4
SiO ₂	35.240	35.110	35.830	35.530	34.580	34.800
TiO ₂	3.200	2.600	2.580	3.210	2.540	2.730
Al ₂ O ₃	17.410	17.510	17.700	17.350	17.540	16.980
FeO	20.130	20.160	19.270	19.210	21.880	21.660
MnO	1.420	1.370	0.710	1.290	1.130	1.050
MgO	9.270	9.240	9.900	8.970	10.010	8.900
CaO	0.000	0.100	0.000	0.180	0.120	0.070
Na ₂ O	0.240	0.310	0.260	0.670	0.130	0.730
K ₂ O	8.550	9.320	9.080	8.950	7.790	8.810
Total	95.460	95.720	95.330	95.360	95.720	95.730
以 22 个氧原子为基础计算的阳离子系数						
Si	5.398	5.393	5.461	5.442	5.306	5.376
Al ^{IV}	2.602	2.607	2.539	2.558	2.695	2.624
Al ^{VI}	0.542	0.562	0.640	0.573	0.477	0.468
Ti	0.369	0.300	0.296	0.370	0.293	0.317
Fe ³⁺	0.468	0.319	0.425	0.404	0.403	0.262
Fe ²⁺	2.111	2.271	2.031	2.057	2.405	2.537
Mn	0.184	0.178	0.092	0.167	0.147	0.137
Mg	2.117	2.116	2.249	2.048	2.290	2.050
Ca	0.000	0.0165	0.000	0.030	0.020	0.012
Na	0.071	0.092	0.077	0.199	0.039	0.219
K	1.671	1.8262	1.765	1.7487	1.5247	1.736
Total	15.532	15.681	15.575	15.596	15.597	15.740
Al ^{VI} + Fe ³⁺ + Ti	1.378	1.182	1.361	1.347	1.1731	1.048
Fe ²⁺ + Mn	2.296	2.449	2.123	2.224	2.552	2.674
Ti/(Mg+Fe+Ti+Mn)	0.070	0.058	0.058	0.073	0.053	0.060
Al/(Al+Mg+Fe+Ti+Mn+Si)	0.228	0.230	0.232	0.230	0.226	0.224
^T Al	3.143	3.170	3.179	3.132	3.172	3.092

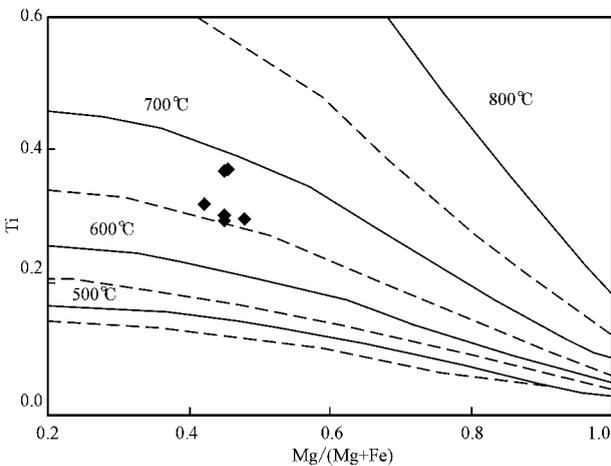


图 3 黑云母的 Ti - Mg/(Mg + Fe) 温度图解
(底图据 Henry *et al.*, 2005)

Fig. 3 Plot of Ti - Mg/(Mg + Fe) for biotites
(after Henry *et al.*, 2005)

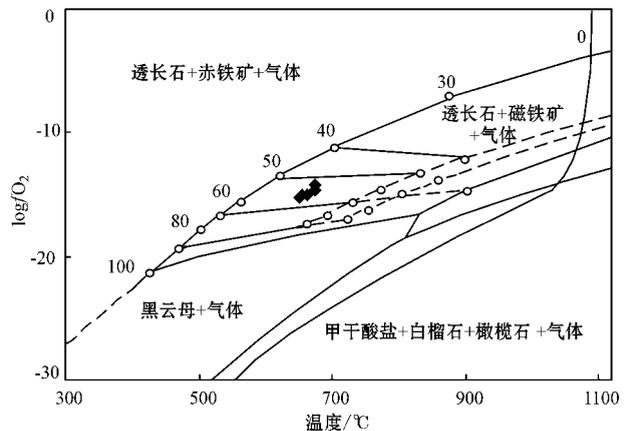


图 4 黑云母的 $\log f_{O_2} - t$ 图解

(底图据 Wones & Eugster, 1965)

Fig. 4 Plot of $\log f_{O_2} - t$ for biotites

(after Wones & Eugster, 1965)

表 3 艾日垦其垦矿区岩石及矿石主量元素($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 3 Major oxide ($w_B/\%$) and trace element (including REE) ($w_B/10^{-6}$) concentrations of Airikenqiken intrusion

样品号	YSY-2	YSY-3	YSY-4	JHK-2	GUK-1	GHG-1	QPG-2	JYY-2
SiO ₂	71.15	71.23	72.63	71.81	48.97	80.68	78.35	72.37
Al ₂ O ₃	15.69	14.65	15.71	14.14	1.35	9.86	0.73	15.16
Fe ₂ O ₃	0.60	0.59	0.76	0.89	16.9	0.18	0.67	0.68
FeO	0.57	0.49	0.52	0.36	0.77	0.40	0.5	0.40
CaO	2.42	2.01	2.60	2.02	1.88	1.07	9.49	2.49
MgO	0.47	0.45	0.52	0.54	1.81	0.22	0.32	0.39
K ₂ O	2.90	2.78	2.20	3.39	0.31	3.31	0.05	2.49
Na ₂ O	4.13	4.10	4.30	2.29	0.15	2.06	<0.01	4.07
TiO ₂	0.11	0.11	0.12	0.10	0.01	0.05	0.01	0.10
MnO	0.06	0.06	0.06	0.03	0.02	0.02	0.30	0.05
P ₂ O ₅	0.06	0.05	0.08	0.07	0.01	0.03	0.01	0.06
H ₂ O ⁺	0.66	0.68	0.96	1.92	0.48	1.00	1.52	0.56
CO ₂	0.26	0.34	0.17	1.47	0.34	0.17	6.64	0.26
LOI	0.68	0.72	1.03	3.32	17.96	1.18	8.08	0.76
Y	8.15	12.30	10.30	6.31	16.70	6.76	14.9	6.43
La	14.6	7.12	18.00	11.7	6.61	6.82	4.01	8.53
Ce	24.2	14.50	29.80	21.9	12.8	11.4	7.40	15.00
Pr	2.34	1.45	2.95	2.01	1.72	1.23	0.85	1.38
Nd	8.19	5.60	10.10	6.76	7.68	4.30	3.61	4.92
Sm	1.23	1.64	1.22	1.05	2.02	0.76	1.04	0.88
Eu	0.20	0.31	0.39	0.21	0.34	0.15	0.30	0.21
Gd	1.35	1.63	1.37	0.90	2.38	0.73	1.39	0.91
Tb	0.16	0.23	0.25	0.14	0.44	0.12	0.27	0.14
Dy	1.06	1.59	1.39	0.82	2.75	0.79	1.85	0.80
Ho	0.22	0.35	0.28	0.16	0.55	0.17	0.41	0.17
Er	0.72	1.31	0.95	0.57	1.67	0.60	1.36	0.59
Tm	0.12	0.21	0.16	0.09	0.23	0.11	0.22	0.11
Yb	0.93	1.71	1.22	0.70	1.40	0.81	1.60	0.86
Lu	0.16	0.28	0.20	0.12	0.18	0.14	0.22	0.15
Sc	1.86	2.32	2.22	2.07	1.07	1.56	0.40	2.29
V	14.5	12.8	18.10	14.5	3.31	7.17	1.13	13.9
Cr	0.61	9.61	2.06	9.77	2.06	1.06	1.18	1.37
Co	1.10	1.33	1.31	0.25	16.60	0.40	1.51	0.99
Ni	1.53	3.55	1.95	5.21	2.15	1.22	3.13	1.77
Cu	33.08	42.2	33.92	301.00	79.10	598.00	787.00	12.3
Zn	17.40	16.00	15.50	4.18	2.55	6.31	4.82	14.8
Ga	13.90	13.00	13.80	14.6	2.78	7.89	3.93	14.00
As	5.16	2.26	1.26	78.2	773 00.00	15.4	57.00	0.94
Rb	86.80	89.3	67.00	123.00	15.10	76.9	1.61	71.20
Sr	658.00	428.00	601.00	46.90	28.40	217.00	170.00	599.00
Zr	68.00	63.40	61.40	48.10	8.32	34.40	2.15	62.50
Nb	8.72	7.77	8.91	7.35	2.09	4.80	0.12	9.58
Mo	0.12	0.20	0.15	3.65	736.00	15.80	58.9	0.49
Cd	0.07	0.06	<0.05	0.07	1.43	0.10	0.18	0.08
Cs	2.28	2.14	2.41	2.31	0.79	2.00	0.16	2.59
Ba	2 514.00	1 211.00	738	1 008	325	1 240.00	3 174.00	1 564.00
Hf	2.39	2.31	2.25	1.73	0.25	1.28	0.08	2.37
Ta	0.89	0.76	0.92	0.76	0.11	0.52	<0.05	1.28
Pb	64.50	44.00	41.4	4.24	296.00	31.6	2.00	54.50
Th	7.08	4.19	9.27	7.70	1.61	3.42	0.24	4.55
U	2.26	1.67	1.09	3.80	1.39	1.93	1.34	2.00

注: YSY-2、YSY-3、YSY-4 为无蚀变岩石样品, JHK-2 为钾化带样品, GUK-1、GUG-1 为硅化带样品, QPG-2 为青磐岩化带样品, JYY-2 为绢英岩化带样品。

$SiO_2 = 71.01\% \sim 73.58\%$; $Na_2O + K_2O = 6.28\% \sim 7.17\%$, $CaO = 1.95\% \sim 2.93\%$ 。稀土含量较低, 稀土配分曲线呈先右倾, 后左倾的趋势(图 5), 微量元素上, 岩体高 Sr ($> 428 \times 10^{-6}$) 低 Y ($< 12.30 \times 10^{-6}$) , 总体上富集大离子亲石元素 LILE (Ba, Th, Rb, K), 亏损高场强元素 HFSE (Nb, Ta, Ti) (图 6), $A/CNK = 1.04 \sim 1.09$, 属于弱过铝质。

4.4 流体包裹体

本次研究共采集到艾日垦其垦铜钼矿区样品 12 件透明矿物相对发育的样品制成包裹体光薄片。研究对象主要为成矿前的无矿石英脉, 成矿期的石英-辉钼矿细脉和石英-黄铜矿细脉, 以及成矿期后的无矿石英和石英-黄铁矿脉等。将其打磨成双面抛光包裹体片, 挑选具代表性的流体包裹体进行分析。

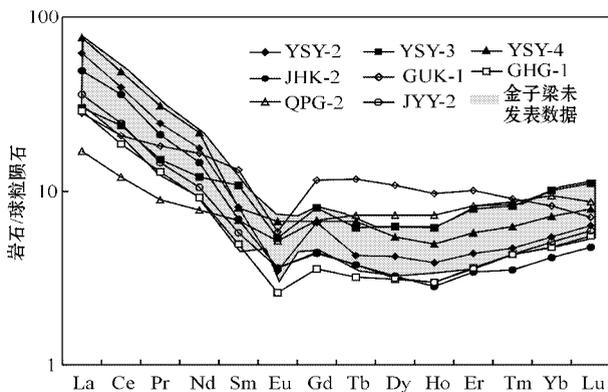


图 5 艾日垦其垦岩体稀土配分图(球粒陨石标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of Airikenqiken granitic rocks (after Sun and McDonough, 1989)

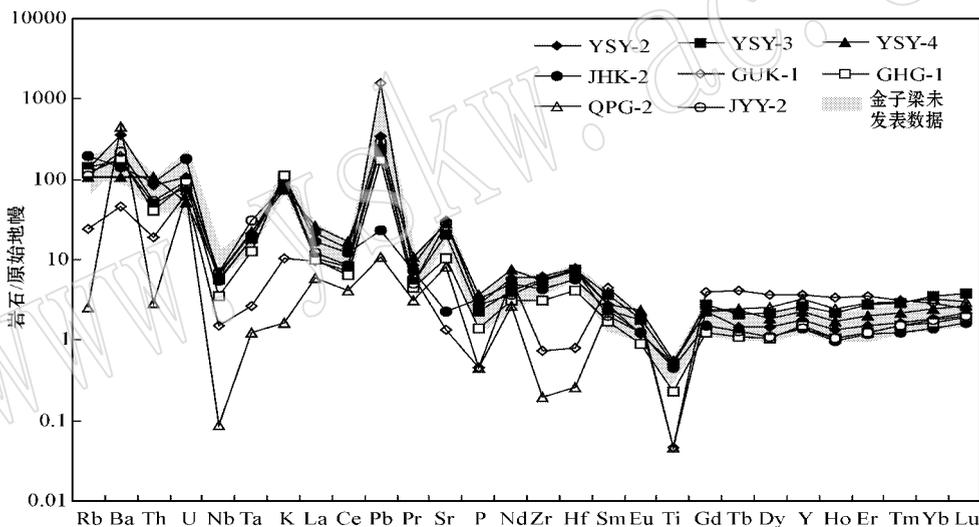


图 6 艾日垦其垦岩体微量元素蜘蛛图(原始地幔数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 MORB-normalized trace elements spider diagram for Airikenqiken intrusive rocks (after Sun and McDonough, 1989)

研究发现约 60% 原生流体包裹体近定向分布, 其余原生流体包裹体成孤立分布或随机成群分布(图 7)。按照物理状态分类, 研究对象主要分三种: ① a 型流体包裹体, 液相 + 气相 (L + V), 这种包裹体的气液比范围为 5% ~ 60%, 多集中于 20% ~ 40%; ② b 型流体包裹体, 即含 CO_2 包裹体 (L + V_{CO_2} + L_{CO_2}), 这种包裹体的气液比相对范围较小, 15% ~ 60% 相对集中于 20% ~ 30%; ③ c 型流体包裹体, 即含石盐子晶包裹体 (L + V + S), 这种包裹体数量极少, 遂未纳入统计。

测温研究(表 4)可将热液活动分为三期(图 8),

其中成矿前与成矿期的热液流体具有以下特征: ① 成矿前 a 型包裹体均一温度为 $135.8 \sim 345.2^\circ C$, 盐度 3.06% ~ 16.24% NaCleq; b 型包裹体均一温度为 $146 \sim 295.2^\circ C$, 盐度 1.22% ~ 19.68% NaCleq; ② 成矿期 a 型包裹体均一温度为 $95.33 \sim 356.2^\circ C$, 盐度 1.74% ~ 17.26% NaCleq; b 型包裹体均一温度为 $110 \sim 295^\circ C$, 盐度 1.02% ~ 19.68% NaCleq; ③ 成矿前期的包裹体的均一温度较成矿期和成矿期后集中在更高的温度区域, 此时 b 型包裹体的均一温度较 a 型包裹体温度普遍更高, 此时包裹体的盐度与成矿期包裹体的盐度相仿略低, b 型包裹体的盐度较 a 型

偏低;到了成矿期,所有包裹体的均一温度都降低,此时 a 型包裹体均一温度向低温集中的趋势显现,b 型包裹体在包裹体总数占比降低,但均一温度偏高。

此外包裹体总体盐度上升,b 型包裹体多数为低盐度,a 型为高盐度;成矿期后,b 型包裹体几乎不见,无论是均一温度还是盐度都达到三个时期的最低。

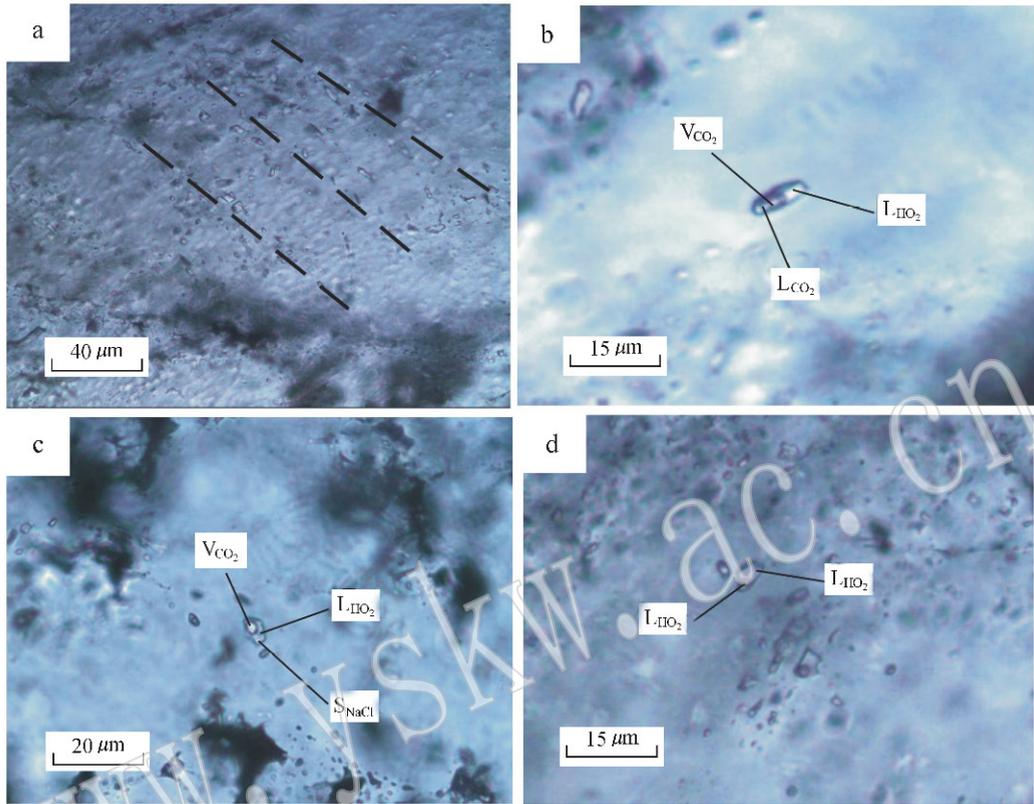


图 7 艾日垦其垦铜钼矿床流体包裹体显微照片

Fig. 7 Photomicrographs of fluid inclusions in the Airikenqiken Cu(Mo) deposit

a—大致定向的原生流体包裹体; b—含 CO₂ 三相流体包裹体; c—含石盐子晶流体包裹体; d—气液两相流体包裹体

a—roughly directed primary fluid inclusion; b—CO₂-bearing phase inclusions; c—salt crystal-bearing fluid inclusions; d—aqueous two-phase inclusions

本区流体包裹体具有粒径小,CO₂ 大量出现,包裹体成大致定向排列等特征。基于张性断裂和扭性断裂中流体包裹体粒径通常较大,而且后者流体包裹体常赋存在辉石和石榴石中等特点判断,本区的热液主要形成于压性环境中,且主要为变质流体而非主要为岩浆直接转化的热液,这一推论也可以解释为何有近半数的原生包裹体近定向排列,而且与本区脉体倾角大,流体包裹体低盐度、粒径小等特点吻合(杨巍然等,1996)。

5 讨论

5.1 成矿年代与构造环境

艾日垦其垦地区火山弧岩浆活动的时间为 441

~369 Ma,与伊犁地块南缘活动陆缘花岗质侵入体形成年龄 436~366 Ma(朱永峰等,2006a)基本一致,表明古生代南天山洋洋壳向伊犁—中天山微板块下的俯冲至少持续到晚泥盆世。作为中亚造山带的一个组成部分,北疆地区在显生宙的地壳生长比较强烈,在石炭纪有过一次遍及整个北疆地区的新生陆壳生长事件(韩宝福等,1997)。

根据含矿脉体的 K/Ar 测年结果,热液矿化时限为 268.35 ± 4.05 Ma,岩浆矿化时限为 321.43 ± 4.24 Ma,岩体锆石 U-Pb 年龄为 320.3 ± 3.5 Ma(金子梁,私人通讯),热液活动与岩浆活动相差较大,结合区域构造演化,研究认为:岩体中绢云母 K/Ar 年龄与早—中二叠纪西天山岩浆成矿事件时代相符(王志良等,2004c),可能由于是晚古南天山洋在中石炭

表 4 艾日垦其垦铜钼矿不同成矿阶段流体包裹体显微测温结果

Table 4 Microthermometric result of fluid inclusions from different mineralization stages of the Airikenqiken Cu(Mo) deposit

成矿阶段	矿物及其产状	包裹体类型	冰晶消失 温度/℃	CO ₂ 笼形物消 失温度/℃	均一温度/℃		盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})\%$	
					范围	集中区间	范围	集中区间
成矿前	无矿石英脉	a(27)	- 1.8 ~ - 12.3		135.8 ~ 345.2	120 ~ 280	3.06 ~ 16.24	8 ~ 12
		b(37)		- 4.6 ~ 9.4	146 ~ 295.2	120 ~ 240	1.22 ~ 19.68	4 ~ 10
成矿期	浸染状、条 带状矿石	a(57)	- 1 ~ - 13.4		95.33 ~ 356.2	80 ~ 200	1.74 ~ 17.26	8 ~ 12
		b(80)		- 4.6 ~ 9.5	110 ~ 395	120 ~ 240	1.02 ~ 19.68	8 ~ 14
成矿后	无矿石英脉	a(21)	- 1 ~ - 8.3			120 ~ 160	1.91 ~ 12.05	4 ~ 8

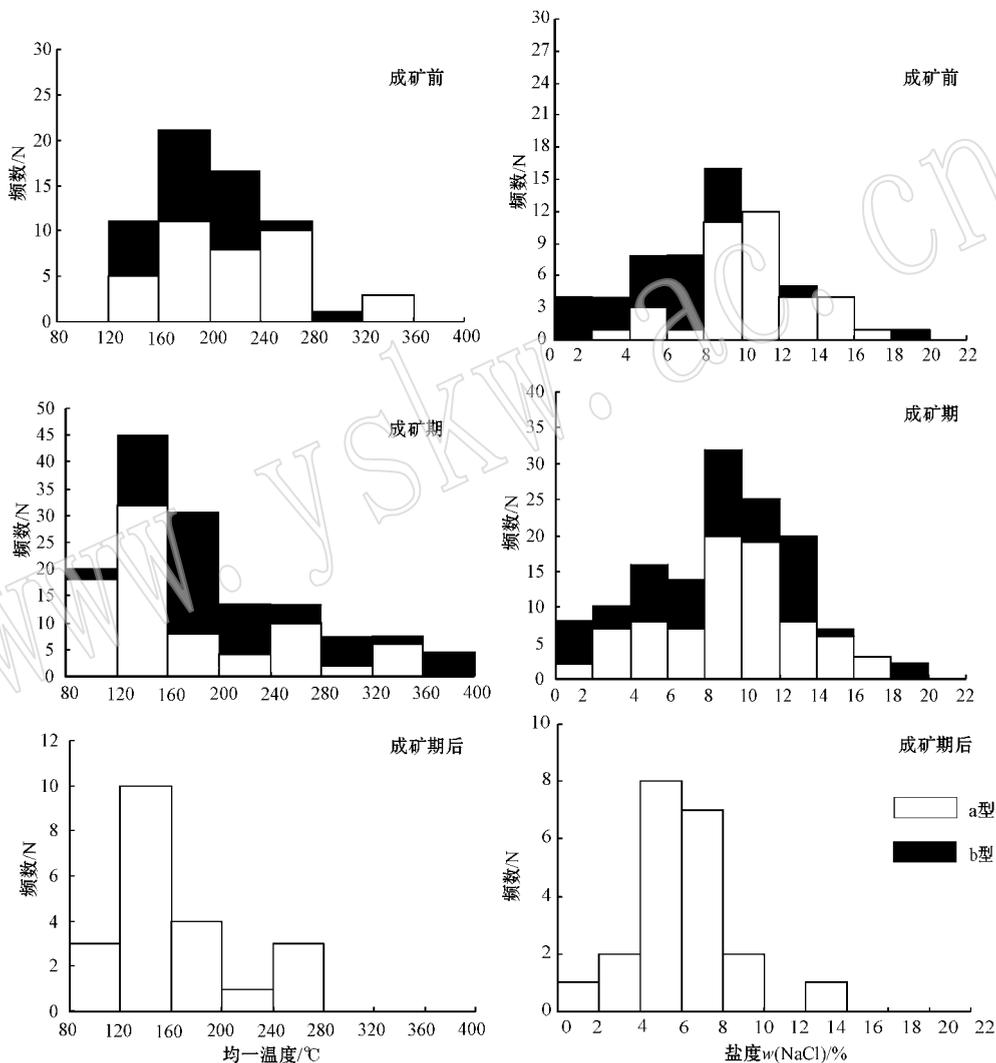


图 8 艾日垦其垦铜钼矿床流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig. 8 Histograms of homogenization temperatures (left) and salinities (right) of fluid inclusions from the Airikenqiken Cu(Mo) deposit

世闭合后,伊犁中天山板块与塔里木板块发生碰撞对接,随后中天山与南天山一起进入板内演化过渡阶段(高俊等,1995;何国琦等,1995)。早二叠世进入陆内裂谷作用阶段,地区发生走滑变形作用(Koen *et al.*, 2009)。中二叠世时,古南天山洋已经

最终闭合,中天山和南天山地区进入了后碰撞伸展阶段,由于陆陆“剪刀式”斜向碰撞,区域出现大量走滑挤压断裂,影响深度很大(Allen *et al.*, 1995; Natal'in and Sengor, 2005)。这一时期后碰撞岩浆活动亦十分强烈(张招崇等,2009)。结合矿区范围内

的岩体属钙碱性系列,其主微量元素地球化学特征显示出这些火成岩应形成于被动大陆边缘碰撞后的伸展环境,之后又经断裂构造作用改造。

5.2 母岩性质

在讨论成矿过程前,有必要讨论母岩类型和岩体的形成机制,因为岩石类型和形成过程与成矿条件密切相关。本矿床岩石数据满足 Defant 和 Drummond (1990) 对埃达克岩 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, 高锆 ($>300 \times 10^{-6}$) 低钇 ($\leq 18 \times 10^{-6}$) 的定义,具有埃达克岩特征。多数岩石样品 SiO_2 含量高于 70%, 说明幔源岩浆物质贡献度不高,应该主要是壳源组分(黄河等, 2010)。艾日垦其垦岩体为弱过铝质, 岩石样品的 Nb/Ta 值为 7.45~10.5, Rb/Sr 值为 0.081~0.23, 这些特征都暗示艾日垦其垦花岗岩源于中下地壳。

稀土曲线先下降,后上倾的配分模式暗示石榴子石大量存在于残留相中。此外,典型埃达克岩的 Eu 为无异常或者正异常(王焰等, 2000),与部分熔融时压力足够大会导致大部分斜长石发生分解有关(张旗等, 2004)。本矿床岩体呈较为明显的负异常特征,暗示部分熔融过程中斜长石少量残留,或者是源区岩石本身贫 Eu。赋矿岩体富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,显示出与俯冲相关的岩浆作用(Stolz *et al.*, 1996)。根据岩体 Ce/Pb 比值判断,岩石样品的 Ce/Pb 比值为 0.14~0.74, 典型地幔的 Ce/Pb = 25 ± 5 , 地壳的 Ce/Pb < 15 (Hofmann, 1988)。低的 Ce/Pb 一般解释为俯冲消减板片来源的流体作用或地壳物质混染。如果是遭受来自俯冲消减板片脱水或熔融形成的流体或熔体改造的地幔,其 Nb 和 Ta、Zr 和 Hf 将发生明显分异(Stolz *et al.*, 1996),在微量元素蛛网图上看出上述组分并无明显负异常(图 6),说明俯冲板片来源的流体作用很弱。根据前人研究(何国琦等, 2001),应该是之前俯冲洋壳成分加入的原因。岩体中含有富水矿物黑云母和 $\text{Mg}^\# = 0.44 \sim 0.53$ 范围也可佐证此推论。 Mo 、Cu 在洋壳中的平均含量远高于陆壳平均值,这样的岩浆组成可为母岩岩浆提供大量矿质。综上所述,岩浆源区成分比较复杂,包括洋壳物质、上地幔物质和陆壳物质。

此外,矿化样品的微量元素数值变化范围较未蚀变岩石幅度更大,且各元素的含量更低。这些主微量元素的特征与美国 Climax 斑岩钼(铜)矿成矿斑岩的特点相似,这种类型的斑岩往往能够形成较

大规模的钼矿床,如 Henderson, Urata, Mount Emmons 以及我国的金堆成斑岩钼矿等(杜灵通, 2005),具有上述特征的埃达克岩质岩浆是保证成矿潜力的重要因素之一。

5.3 成矿过程

埃达克质岩浆一般形成于高温(850~1150°C)高压(1.0~4.0 Ga)的环境中(Kay & Mpodozis, 2001),有利于源区含水矿物分解,使挥发分大量进入熔体相。黑云母具有高 Ti 的特征,也证明残余岩浆富挥发分。高压条件下氯倾向于进入流体相,这是 Cu 等金属元素进入流体的有利条件。另外埃达克质岩浆有高氧逸度的特点,根据黑云母的计算也得出岩体岩浆具有与土屋-延东岩体相类似的氧逸度(张连昌等, 2003),可促使深部金属硫化物反应,使 S 以 SO_4^{2-} 和 SO_2 形式溶解在硅酸盐中(熊小林等, 2005),在这种条件下 Cu 在部分熔融和岩浆演化过程中的逐步与熔体相中富集。

岩浆侵位阶段的物理化学条件也直接影响矿质富集机制。在艾日垦其垦岩体中发现晶洞构造(图 2b)是岩浆向热液阶段转换的主要证据(杨志明等, 2009; 马星华等, 2010),即岩浆挥发分饱和和出溶过程(杨志明等, 2009)。但是根据野外观察,早期形成的石英脉中并非矿石的主要载体。为什么岩浆矿化期没有形成主要矿体呢?根据区域地质资料和野外观察(图 1)发现岩体侵位于长城系地层,属于非常古老的地层,同时岩体露头面积较大,也指示岩体的侵位很深。一般而言,侵位太大使得流体难以达到饱和和出溶,因而不利于岩浆向热液转化。岩浆中的金属矿物很难通过热液进一步富集,而容易在深部分散于岩浆房中,故未形成典型斑岩铜钼矿床。尽管如此,由于未蚀变岩石中的 Cu、Mo 等金属元素含量仍然明显高于地壳平均水平,研究认为岩浆作用为矿床的形成做了金属预富集。

流体包裹体测温显示本矿床流体包裹体兼有变质热液和岩浆热液流体包裹体的特点。其中具变质特征的近定向流体包裹体约占总包裹体数的 60%。钾长石英脉中钾长石的年龄为 268.35 ± 4.05 Ma,表明流体在这段时间里将深部的成矿物质带到近地表的浅层。因此,艾日垦其垦铜钼矿床是多期构造运动叠加而形成的岩浆-热液矿床。

5.4 与临近矿床对比

西天山阿拉套-科古琴铜多金属成矿带的达巴特铜矿成岩年龄为 317 Ma,成矿年代为 301 Ma(张

作衡等,2006)喇嘛苏铜矿的成矿年代为海西中期;阿吾拉勒铜银多金属成矿带中穷布拉克铜银矿的成矿年代为 274 Ma,群吉铜矿的成矿时期为海西晚期(王志良等,2004c);3571 铜矿和莱历斯高尔铜钼矿成矿岩体的锆石 LA-ICP-MS 定年结果为 354 ± 0.65 Ma 和 346 ± 1.2 Ma(张东阳等,2009);乔霍特铜矿的成矿时间为 274.78 ± 0.44 Ma,成岩时间为 318.29 ± 5.13 Ma(王志良等,2004a)。根据构造位置、岩体结晶年龄以及成矿年龄等特征,研究推断艾日垦其垦矿床应为阿吾拉勒铜银多金属成矿带在中天山的延伸。

根据陈富文等(2005)报道,土屋和延东矿区的矿化斜长花岗斑岩体的年龄分别为 334 ± 3 Ma 和 333 ± 4 Ma,赤湖斑岩钼矿区矿化斜长花岗斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 322 ± 10 Ma。东西天山斑岩型矿床的成矿斑岩的形成年代基本一致(吴华等,2006),并且已有的资料表明它们基本上都产出于相似的构造环境,即晚古生代岛弧环境(王志良等,2004c)。

乔霍特新疆和静县巴音布鲁克镇东 50 km,1996 年估算储量 33.7×10^4 t(王志良等,2004b),目前为中型以上火山热液矿床,铜银品位好。由微量元素特征可知,位于艾日垦其垦矿区西侧的乔霍特铜矿,其赋矿岩体的主微量元素与本矿区岩体含量十分相似(张喜等,2010),且其矿区的岩株状钾长花岗岩体的 K/Ar 年龄为 318.29 ± 5.13 Ma,花岗岩中的钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 274.78 ± 0.44 Ma,等时线年龄为 272.7 ± 3.0 Ma(王志良等,2004a),本矿床岩体的绢云母 K/Ar 年龄为 321.43 ± 4.24 Ma,钾长石英脉中钾长石的 K/Ar 年龄为 268.35 ± 4.05 Ma,暗示本矿区可能与之有相同的岩浆来源与类似的演化过程,并且可能产生于同一系列的构造成矿背景下。这都为下一步找矿提供了良好的依据和借鉴经验,也指示本矿区较好的成矿潜力。但与东天山的土屋-延东斑岩铜钼矿和境外西天山的阿尔玛雷克斑岩铜矿相比(李福春等,1995;陈丹玲等,2001;张连昌等,2003),火山作用发育不够强烈,侵位太深等因素可能导致艾日垦其垦难以形成大型、超大型矿床。

6 结论

(1) 艾日垦其垦矿床母岩岩浆为埃达克质岩

浆,含有洋壳、上地幔和陆壳成分,源区富集 Cu 等金属元素,而且高氧逸度、高温、高压等物理化学条件有利于携带大量金属元素。

(2) 岩浆上涌阶段时限为 321.43 ± 4.24 Ma,但由于侵入深度太深,热液难以从岩浆中分离出来,所以未形成大规模矿化作用,导致金属在岩浆中分散,未能富集成矿,但为矿床形成做了金属的预富集。

(3) 时限为 268.35 ± 4.05 Ma 的二叠纪热液作用是艾日垦其垦铜钼矿床形成的主要地质作用,热液可能由西天山普遍发育的二叠纪侵入岩岩浆和后碰撞期的走滑挤压断层等活动诱发产生的岩浆热液和变质热液,热液将原来赋存于之前侵入岩中的矿质萃取带到浅层近地表富集成矿。

(4) 艾日垦其垦铜钼矿床属于岩浆作用和构造运动叠加生成的岩浆-热液矿床。且与区域矿床可能拥有同样物质来源和岩浆演化过程,火山作用不够强烈,岩浆侵位过深等原因可能导致艾日垦其垦矿床难以形成大型、超大型矿床。

致谢 野外地质工作得到河南省有色金属地质矿产局第五地质大队的大力支持和帮助;实验过程中,得到张东阳、胡乔青和骆文娟等同志的帮助;研究分析过程中,中国地质大学(北京)张招崇教授、黄河、王萌和王圆圆等同志都为作者提出宝贵建议;感谢匿名审稿人为文章提出的宝贵意见。谨此一并感谢。

References

- Albuquerque A C. 1973. Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 37: 1779 ~ 1802.
- Allen M B, Sengor A M C and Natal'in B A. 1995. Junggar, Turfan and Alakol basins as Late Permian to Early Triassic extensional structures in sinistral shear zone in the Altaid orogenic, Central Asia [J]. *Journal of Geological Society, London*, 152: 327 ~ 338.
- Chen Danling, Liu Liang, Che Zicheng, et al. 2001. Geochemical characteristic and tectonic implication of Carboniferous volcanite in the Luotugou area of Middle Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 378 ~ 384 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fuwen, Li Huaqin, Chen Yuchuan, et al. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of mineralization Tuwu-Yandong porphyry copper mine, East Tianshan Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 256 ~ 261 (in Chinese with English ab-

- stract).
- Chen Yanjing. 1996. Mineralization during collisional orogenesis and its control of the distribution of gold deposits in Junggar mountains. Xinjiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 70(3): 253 ~ 261(in Chinese with English abstract).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magma by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347 : 662 ~ 665.
- Ding Xiaoshi. 1988. Study of typomorphic characteristic of micas from granitoids in central-southern Tibet and their geological significance [J]. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences*, 1 : 33 ~ 50(in Chinese with English abstract).
- Du Lingtong. 2005. Source of ore-forming material and genesis analysis of Yongping copper deposit, Jiangxi [J]. *Resources Environment and Engineering*, 19(1): 4 ~ 11(in Chinese with English abstract).
- Etsuo Uchida, Sho Endo and Mitsutoshi Makino. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Resource Geology*, 57(1): 47 ~ 56.
- Han Baofu, Wang Shiguang, Jiang Boming, *et al.* 1997. Nd isotopic characteristics and its significance of Phanerozoic crustal growth of alkali granites along ulungur river, Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(17): 1 829 ~ 1 831(in Chinese with English abstract).
- He Guoqi and Li Maosong. 1995. Study on Paleozoic Ophiolites and their Tectonic Significance in Hinggan-Monglian-North Xinjiang and Adjacent Area [C]. *Symposium of the Ophiolite and Geodynamics Seminar* : 104 ~ 107(in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Li Maosong and Han Baofu. 2001. Geotectonic research of southwest Tianshan and its west adjacent, China [J]. *Xinjiang Geology*, 19(1): 7 ~ 11(in Chinese with English abstract).
- Henry D J, Guidotti C V and Thomason J A. 2005. The Tianturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites : Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms [J]. *Am Mineral*, 90 : 316 ~ 328.
- Hofmann W. 1988. Chemical differentiation of the earth : The relationship between mantle, continental crust and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90 : 297 ~ 314.
- Hou Zengqian, Pan Xiaofei, Yang Zhiming, *et al.* 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposits no Related to Oceanic-Slab Subduction : Examples from Chinese Porphyry Deposits in Continental Settings [J]. *Geosciences*. 21(2): 332 ~ 351(in Chinese with English abstract).
- Huang He, Zhang Dongyang, Zhang Zhaochong, *et al.* 2010. Petrology and geochemistry of the Chuanwulu alkaline complex in South Tianshan : Constraints on petrogenesis and tectonic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 947 ~ 962(in Chinese with English abstract).
- Kay S M and Mpodozis C. 2001. Central Andean ore deposits linker to involving shallow subduction systems and thickening crust [J]. *GSA Today*, 4 ~ 9.
- Koen de Jong, Bo Wang, Michel Faure, *et al.* 2009. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the Late Palaeozoic tectonic evolution of the western Tianshan (Xinjiang, northwestern China), with emphasis on Permian fluid ingress [J]. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 98 : 1 239 ~ 1 258.
- Li Fuchun and Cai Hongyuan. 1995. Aermaleike porphyry copper geological features-regional metallogenesis geological background [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1(9): 18 ~ 22(in Chinese with English abstract).
- Ma Xinghua, Chen Bin, Lai Yong, *et al.* 2010. Fluid exsolution evolution and mineralization in porphyry Cu-Mo deposit : A case study from the Aolunhua deposit, southern Da Xing'an Mts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 397 ~ 1 410(in Chinese with English abstract).
- Natal'in B A and Sengor A M. 2005. Late Paleozoic to Triassic evolution of the Turan and Scythian platforms : The pre-history of the Paleozoic-Tethyan closure [J]. *Tectonophysics*, 404 : 175 ~ 202.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications* ; 42 : 313 ~ 345.
- Stolz A J, Jochum K P and Hofmann A W. 1996. Fluid and melt related enrichment in the subarc mantle : Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalt [J]. *Geology*, 24 : 587 ~ 590.
- Wang Xinyu. 2010. Hejing County Ai cultivated its Ken gold geological characteristics and metallogenetic Analysis [J]. *West-China Exploration Engineering*, 6 : 104 ~ 107(in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Zhang Qi and Qian Qing. 2000. Adakite : Geochemical characteristics and tectonic significance [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251 ~ 256(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhiliang, Mao Jingwen, Yang Jianmin, *et al.* 2004a. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ isotope dating of K-feldspar from moyite in the Qiaohuote copper deposit, Xinjiang, and its geological implication [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(1): 12 ~ 18(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhiliang, Mao Jingwen, Yang Jianmin, *et al.* 2004b. Geochemistry of ore-forming Fluids in the Qiaohuote Copper Deposit of Hejing County, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(5): 549 ~ 554(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhilian, Mao Jingwen and Zhang Zuoheng. 2004c. Types, characteristics and metallogenetic geodynamic evolution of the Paleozoic polymetallic copper-gold deposits in the Western Tianshan Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 78(6): 836 ~ 847(in Chinese with English abstract).

- Wang Zhiliang, Mao Jingwen, Zang Zuoheng, *et al.* 2006. Geology, time-space distribution and metallogenic geodynamic evolution of porphyry copper (molybdenum) deposits in the Tianshan Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 943~955 (in Chinese with English abstract).
- Wei Fei, Liu Yulin, Guo Guolin, *et al.* 2009. Characteristics and genesis significance of Titanium minerals of Baogutu porphyry copper deposit, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 645~649 (in Chinese with English abstract).
- Wones D P and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application [J]. *The American Mineralogist*, 50: 1 228~1 272.
- Wu Hua, Li Huaqin, Chen Fuwen, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of plagiogranite porphyry in the Chihu molybdenum-copper district, Hami, East Tianshan [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(5): 549~555 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaolin, Cai Zhiyong, Niu Hecai, *et al.* 2005. The late Paleozoic adakites in eastern Tianshan area and their metallogenic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 967~976 (in Chinese with English abstract).
- Yang Weiran and Zhang Wenhui. 1996. Character of fault property and combination of fluid inclusions. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* [J]. 21(3): 285~290 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming and Hou Zengqian. 2009. Genesis of giant porphyry Cu deposit at Qulong, Tibet: constraints from fluid inclusions and H-O isotopes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1 838~1 859 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dongyang, Zhang Zhaochong, Ai Yu, *et al.* 2009. Geochronology, geochemistry of the ores-bearing porphyries in the Lailisigao'er region, western Tianshan; Implications for their tectonic setting and mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 319~1 331 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dongyang, Zhang Zhaochong, Xue Chunji, *et al.* 2010. Petrology and geochemistry of the ore-forming porphyries in the Lamasu, copper deposit western Tianshan: Implication for petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 680~694 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Qin Kezhang, Ying Jifeng, *et al.* 2003. The relationship between ore-forming processes and adakitic rock in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenic belt, eastern Tianshan mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 259~268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Xu Jifeng, Wang Yan, *et al.* 2004. Diversity of adakite [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9~10): 959~965 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xi, Gao Jun, Dong Lianchang, *et al.* 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of I type granitoids from Qiaohuote copper deposit in Central Tianshan of Xinjiang and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1 637~1 648 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Dong Shuyun, Huang He, *et al.* 2009. Geology and geochemistry of the Permian intermediate-acid intrusions in the southwestern Tianshan, Xinjiang, China: implications for petrogenesis and tectonics [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1 827~1 839 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Mao Jingwen, Wang Zhiliang, *et al.* 2006. Geology and Metallogenetic Epoch of the Dabate Porphyry Copper Deposit in West Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 52(5): 683~689 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Guo Xuan and Zhou Jing. 2006a. Petrology and geochemistry of a ϵ Nd gabbro body in Baluntai region, central Tianshan mountains, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 178~1 192 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng and Song Biao. 2006b. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on hydrothermal zircon rim in granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 135~144 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Liu Yike and Zhang Zhaochong. 2011. Tectonic evolution of Central and South Tianshan Orogenic Belts in the Central Asia and mineralization background [J]. *Geosciences*, 25(1): 1~14 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈丹玲, 刘良, 车自成, 等. 2001. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境 [J]. *岩石学报*, 17(3): 378~384.
- 陈富文, 李花芹, 陈毓川, 等. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿田成岩时代精确测定及其地质意义 [J]. *地质学报*, 79(2): 256~261.
- 陈衍景. 1996. 准噶尔造山带碰撞体制的成矿作用及金等矿床分布规律 [J]. *地质学报*, 70(3): 253~261.
- 丁孝石. 1988. 西藏中南部花岗岩类中云母矿物类型特征及其地质意义 [J]. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, 1: 33~50.
- 杜灵通. 2005. 江西永平铜矿成矿物质来源及矿床成因分析 [J]. *资源环境与工程*, 19(1): 4~11.
- 高俊, 汤耀庆, 肖序常. 1995. 西南天山岩石圈板块构造演化 [J]. *中国地质科学院地质研究所所刊*, 28: 62~71.
- 韩宝福, 王式洸, 江博明, 等. 1997. 新疆乌伦古河碱性花岗岩 Nd 同位素特征及其对显生宙地壳生长的意义 [J]. *科学通报*, 42(17): 1 829~1 831.
- 何国琦, 李茂松. 1995. 兴蒙-北疆及临区古生代蛇绿岩的对比研究及其大地构造意义 [C]. *蛇绿岩与地球动力学研讨会论文集*,

- 104-107.
- 何国琦,李茂松,韩宝福. 2001. 中国西南天山及邻区大地构造岩浆[J]. 新疆地质, 19(1):7-11.
- 侯增谦,徐兴旺,屈迅,等. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿[J]. 现代地质, 21(2):332-351.
- 黄河,张东阳,张招崇,等. 2010. 南天山川鲁碱性杂岩体的岩石学和地球化学特征及其岩石成因[J]. 岩石学报, 26(3):947-962.
- 李福春,蔡宏渊. 1995. 阿尔玛雷克斑岩铜矿地质特征-区域成矿地质背景[J]. 矿产与地质, 1(9):18-22.
- 马星华,陈斌,赖勇,等. 2010. 斑岩铜钼矿床成矿流体的出溶、演化与成:以大兴安岭南段敖伦花矿床为例[J]. 岩石学报, 26(5):1397-1410.
- 王新宇. 2010. 和静县艾日垦其垦金矿地质特征与成矿远景浅析[J]. 西部探矿工程, 6:104-107.
- 王焰,张旗,钱青. 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 35(2):251-256.
- 王志良,毛景文,杨建民,等. 2004a. 新疆巴音布鲁克乔霍特铜矿区钾长花岗岩中钾长石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 23(1):12-18.
- 王志良,毛景文,杨建民,等. 2004b. 新疆和静县乔霍特铜矿床成矿流体地球化学特征[J]. 地球学报, 25(5):549-554.
- 王志良,毛景文,张作衡,等. 2004c. 西天山古生代铜金多金属矿床类型、特征及其成矿地球动力学演化[J]. 地质学报, 78(6):836-847.
- 王志良,毛景文,张作衡,等. 2006. 新疆天山斑岩铜钼矿地质特征、时空分布及其成矿地球动力学演化[J]. 地质学报, 80(7):943-955.
- 魏斐,刘玉琳,郭国林,等. 2009. 包古图斑岩铜矿床的钛铁矿物特征及其成因意义[J]. 岩石学报, 25(3):645-649.
- 吴华,李华芹,陈富文,等. 2006. 东天山哈密地区赤湖钼铜矿区花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 25(5):549-552.
- 熊小林,蔡志勇,牛贺才,等. 2005. 东天山晚古生代埃达克岩成因及铜金成矿意义[J]. 岩石学报, 21(3):967-976.
- 杨巍然,张文淮. 1996. 断裂性质与流体包裹体组合特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 21(3):285-290.
- 杨志明,侯增谦. 2009. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿的成因:流体包裹体及 H—O 同位素证据[J]. 地质学报, 83(12):1838-1859.
- 张东阳,张招崇,艾羽,等. 2009. 西天山莱利斯高尔一带铜(钼)矿成矿斑岩年代学、地球化学及其意义[J]. 岩石学报, 25(6):1319-1331.
- 张东阳,张招崇,薛春纪,等. 2010. 西天山喇嘛苏铜矿斑岩的岩石学、地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石学报, 26(3):680-694.
- 张连昌,秦克章,英基丰,等. 2003. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 20(2):259-268.
- 张旗,许继峰,王焰,等. 2004. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报, 23(9-10):959-965.
- 张喜,高俊,董连慧,等. 2010. 新疆中天山乔霍特铜矿区 I 型花岗岩锆石 La-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(6):1637-1648.
- 张招崇,董书云,黄河,等. 2009. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学:岩石成因和构造背景[J]. 地质通报, 28(12):1827-1839.
- 张作衡,毛景文,王志良,等. 2006. 新疆西天山达巴特铜矿地质特征和成矿时代研究[J]. 地质论评, 52(5):683-689.
- 朱永峰,郭漩,周晶. 2006a. 新疆中天山巴仑台地区晚石炭世 $^{143}\text{Nd}/^{147}\text{Sm}$ 辉长岩体的岩石学和同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5):1178-1192.
- 朱永峰,宋彪. 2006b. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究:兼论花岗岩中热液锆石边的定年[J]. 岩石学报, 22(1):135-144.
- 左国朝,刘义科,张招崇,等. 2011. 中亚地区中、南天山造山带构造演化及成矿背景分析[J]. 现代地质, 25(1):1-14.