

新疆东天山地区土屋和延东铜矿床斑岩-叠加 改造成矿作用*

王云峰^{1,2}, 陈华勇^{1**}, 肖兵^{1,2}, 韩金生¹, 杨俊弢³

(1 中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 新疆地质矿产开发局第一地质大队, 新疆 昌吉 831100)

摘要 土屋和延东铜矿床位于东天山大南湖-头苏泉岛弧带南部, 是中亚成矿带的重要组成部分。文章根据脉次穿插关系、蚀变矿物组合及矿物共生关系, 将土屋和延东铜矿床均划分为斑岩成矿期、叠加改造期和表生期3个期次。土屋铜矿床的铜矿化形成于斑岩成矿期和叠加改造期, 而延东铜矿床的铜矿化主要形成于叠加改造期; 土屋和延东铜矿床伴生的钼矿化主要形成于叠加改造期。因此, 笔者认为前人获得的辉钼矿 Re-Os 年龄(326.2~322.7 Ma)代表叠加改造期的成矿年龄, 该期矿化与石英钠长斑岩((323.6 ± 2.5) Ma)的侵入相关, 而斑岩成矿期的矿化与斜长花岗斑岩(339~332 Ma)相关, 成矿年龄为 341.2~333.9 Ma。叠加改造期的存在, 使得斑岩成矿期的蚀变分带可能受到了叠加和破坏。

关键词 地质学; 土屋-延东; 铜矿床; 成矿期次; 斑岩-叠加改造成矿

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Porphyrific-overlapped mineralization of Tuwu and Yandong copper deposits in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang

WANG YunFeng^{1,2}, CHEN HuaYong¹, XIAO Bing^{1,2}, HAN JinSheng¹ and YANG JunTao³

(1 Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 No. 1 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration, Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract

The Tuwu and Yandong copper deposits, located in the southern segment of the Dananhu-Tousuquan island arc belt, are important parts of the Central Asian Metallogenic Belt. According to the crosscutting relationships and mineral assemblages, the mineralization in both Tuwu and Yandong copper deposits can be divided into three periods: the porphyritic-mineralization period, the overlapped-mineralization period and the supergene period. The porphyritic-mineralization period and the overlapped-mineralization period are the metallogenic periods of copper in the Tuwu copper deposit, while the overlapped-mineralization period is the most important copper metallogenic period in the Yandong copper deposit. In addition, the associated molybdenite mineralization was mainly existent in the overlapped-mineralization period in Tuwu and Yandong. Therefore, the molybdenite Re-Os ages (326.2~322.7 Ma) obtained in previous studies should represent the age of the overlapped-mineraliza-

* 本文受到国家重点基础研究计划“973”项目“新疆北部古弧盆体系成矿机理(批准号: 2014CB440802)”资助

第一作者简介 王云峰, 男, 1989年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: yunjia512510@163.com

** 通讯作者 陈华勇, 男, 1976年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿床学研究。Email: huayongchen@gig.ac.cn

收稿日期 2015-04-21; 改回日期 2015-12-07。张绮玲编辑。

tion period in the Tuwu and Yandong copper deposits, and the porphyritic-mineralization, with the age of $341.2 \sim 333.9$ Ma, is the result of the ore-bearing plagiogranite porphyry ($339 \sim 332$ Ma). The emplacement of quartz albite porphyry ((323.6 ± 2.5) Ma) is thought to have caused the overlapped-mineralization which destroyed and modified the previous porphyritic-mineralization.

Key words: geology, Tuwu and Yandong, copper deposit, metallogenetic period, porphyritic-overlapped mineralization

土屋和延东铜矿床位于哈密市西南约 80 km 处,是新疆地质找矿工作的重要成果。土屋铜矿床于 1994 年由新疆地质勘查局第一地质大队发现,在 1997 年开展铜矿普查后,相继又发现了延东、土屋东及延西等一系列铜矿床,这些铜矿床构成了土屋-延东铜矿带。土屋-延东铜矿带一经发现便引起了国内外学者的高度关注,并对它们进行了广泛研究,包括成矿构造背景(Xiao et al., 2004; 左国朝等, 2006; 王京彬等, 2006)、容矿围岩性质(芮宗瑶等, 2001; 刘德权等, 2003; 申萍等, 2012)、矿化与蚀变特征(王福同等, 2001; 陈文明, 2002; Shen et al., 2014a, 2014b)、成岩成矿时代(芮宗瑶等, 2002a; 2002b; 郭谦谦等, 2010; 张达玉等, 2010)、岩石地球化学特征(张连昌等, 2004; Zhang et al., 2006; 侯广顺等, 2005; 李向民等, 2006)、成矿流体特征(陈文明等, 2002; 郭红霞, 2005; Han et al., 2006)等方面,并取得了一系列的成果。

然而,土屋和延东铜矿床在基础地质研究方面仍存在问题,如一直被认为是致矿岩体的斜长花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄主要集中在 $339 \sim 332$ Ma(刘德权等, 2003; 陈富文等, 2005; 侯广顺等, 2005; 郭谦谦等, 2010; 张达玉等, 2010; Shen et al., 2014a, 2014b; 王银宏等, 2014),而辉钼矿 Re-Os 年龄则集中在 $326.2 \sim 322.7$ Ma(芮宗瑶等, 2002b; 张达玉等, 2010),两者相差 6 Ma 以上;又如土屋和延东铜矿床蚀变分带特征不典型,延东铜矿床的钾化蚀变不明显,绿泥石化则在主成矿阶段大量出现,这些蚀变特征与世界上的典型斑岩铜矿(Sillitoe, 2010)具有明显的不同。

本文在前人的研究基础上,通过野外调查、钻孔编录、手标本的描述与分析、岩相学鉴定等手段,根据脉次间穿插关系、蚀变矿物组合及矿物共生关系等现象,重新划分了土屋和延东铜矿床的成矿期次,并在此基础上结合前人的研究成果分析了土屋和延

东铜矿床的成矿特点。

1 区域地质

东天山地区位于天山山脉的最东段、中亚造山带的南部(Xiao et al., 2004),从北向南可分为 3 个大的构造单元:哈尔里克构造带、觉罗塔格构造带及中天山地块(Qin et al., 2011)。其中,哈尔里克构造带主要由奥陶系—石炭系火山岩、花岗岩及铁镁质-超铁镁质杂岩组成;觉罗塔格构造带主要由火山岩及沉积地层组成;中天山地块主要由结晶基底组成(李智明等, 2006; Shen et al., 2014a; 2014b)。

觉罗塔格构造带又被康古尔-黄山断裂及雅满苏断裂分为大南湖-头苏泉岛弧带、康古尔韧性剪切带及雅满苏岛弧带(图 1),且 3 个次级构造带具有各自不同的成矿特征。大南湖-头苏泉岛弧带分布在康古尔-黄山断裂以北,带内分布有一系列铜矿床,如土屋铜矿床、延东铜矿床和赤湖斑岩铜矿床;康古尔韧性剪切带分布在康古尔-黄山断裂与雅满苏断裂之间,岩石大多发生了绿片岩相变质,带内分布有一系列造山型金矿床和铜镍硫化物矿床,如夹白山金矿床、黄山铜镍矿床;雅满苏岛弧带分布在雅满苏断裂以南,带内分布着一系列的铁、铜、金和银矿床,如雅满苏铜铁矿床、维权银铜矿床和路白山铜矿床(Han et al., 2006; Shen et al., 2014a; 2014b; Gao et al., 2014)。

土屋和延东铜矿床位于大南湖-头苏泉岛弧带,该带出露的地层主要为泥盆系—石炭系钙碱性火山岩和火山碎屑岩,以及侏罗系碎屑岩。带内断裂主要为一系列的 NW 向及 NE 向断层。有石英钠长斑岩、斜长花岗斑岩、闪长玢岩、花岗斑岩、闪长岩等侵入岩在带内出露,其中斜长花岗斑岩与土屋、延东、赤湖及灵龙等矿床中的斑岩铜矿化关系密切(李文明等, 2002; 周涛发等, 2010)。

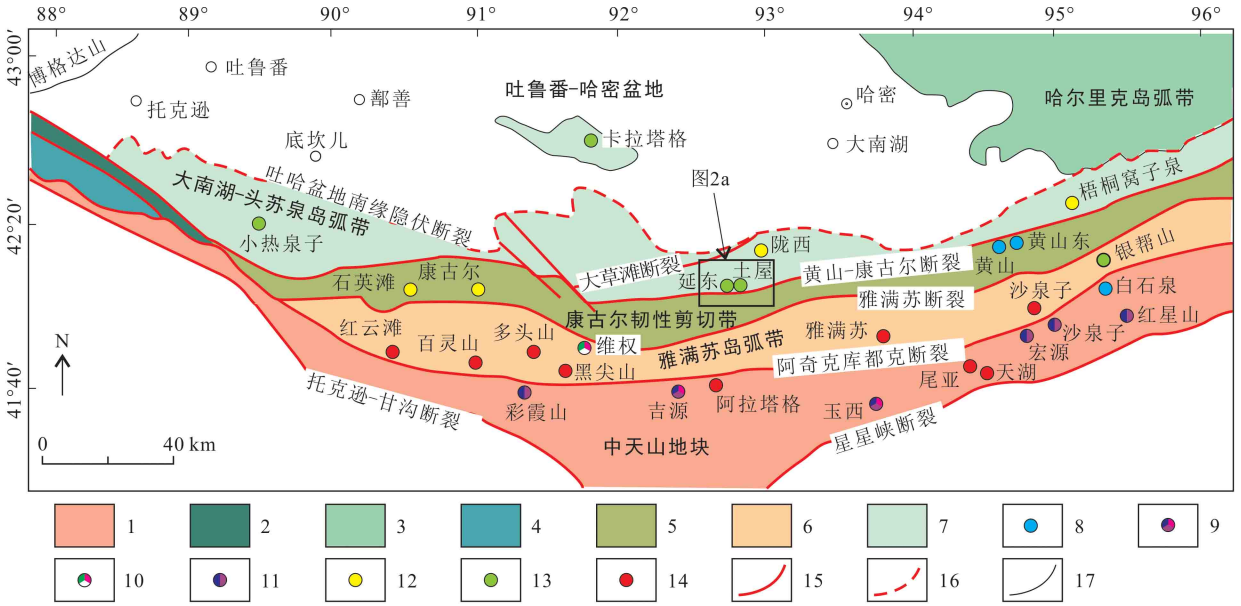


图 1 东天山地区构造单元划分图(据秦克章等,2003 修改)

1—中天山地块; 2—甘沟早古生代蛇绿混杂岩带; 3—哈尔里克岛弧带; 4—甘沟志留系前陆盆地; 5—康古尔韧性剪切带; 6—雅满苏岛弧带; 7—大南湖-头苏泉岛弧带; 8—铜镍硫化物矿床; 9—银-铅-锌多金属矿床; 10—银-铜多金属矿床; 11—铅锌矿床; 12—金矿床; 13—铜矿床; 14—铁(铜)矿床; 15—断裂; 16—隐伏断裂; 17—地质界线

Fig. 1 Tectonic scheme of the Eastern Tianshan Mountains (modified after Qin et al., 2003)

1—Middle Tianshan block; 2—Gangou Early Paleozoic ophiolite belt; 3—Harlik island arc; 4—Gangou Silurian foreland basin; 5—Kangguer ductile shear zone; 6—Yamansu island arc; 7—Dananhu-Tousuquan island arc; 8—Magmatic Cu-Ni sulfide deposit; 9—Ag-Pb-Zn deposit; 10—Ag-Cu deposit; 11—Pb-Zn deposit; 12—Au deposit; 13—Cu deposit; 14—Fe(-Cu) deposit; 15—Fault; 16—Buried fault; 17—Geological boundary

2 矿区地质

土屋和延东铜矿床位于觉罗塔格构造带北部的大南湖-头苏泉岛弧带南缘,南距康古尔断裂 1~3 km。矿区出露地层主要为下石炭统企鹅山群第一组(C_1Q^1)、第二组(C_1Q^2),及侏罗系西山窑组(J_2x)。企鹅山群第一组、第二组可细分为 5 个岩性段(图 2a):第一组第一段为玄武岩段,该段以玄武岩为主,其次为安山岩、凝灰岩;第二段为含砾砂岩段,该段主要为含砾不等粒长石岩屑砂岩、粉砂岩夹砂质千枚岩、凝灰岩和少量玄武岩。第二组第一段为不等粒长石岩屑砂岩夹火山角砾岩段,主要岩性为长石岩屑砂岩、凝灰岩、沉凝灰岩,其次为玄武岩、安山岩、安山质角砾熔岩;第二段为安山集块角砾熔岩段,主要由灰绿色—紫红色安山质集块角砾熔岩和安山岩、玄武岩组成;第三段为复成分砾岩段,主要岩性为蚀变复成分砾岩(申萍等,2012;潘鸿迪等,2013)。地层总体向南倾斜,倾角 43~63°。侏罗系西山窑组(J_2x)大面积分布于大草滩深大断裂南侧,

产状平缓,倾角 10~25°之间,与下伏石炭系呈角度不整合接触。岩性组合有粗砂岩、细砂岩、粉砂岩、复成分砾岩、石英砾岩、含铁质结核、铁(硅)化木,夹菱铁矿层及煤层(郭谦谦等,2010)。矿区构造总体上为一轴向近 EW 向的复式背斜构造,近 EW 向的断裂和破碎带发育。

矿区内侵入岩发育,出露的浅成-超浅成岩主要有花岗斑岩、闪长玢岩、斜长花岗斑岩和石英钠长斑岩,多呈岩枝、岩脉状产出。其中,斜长花岗斑岩主要出露在矿区的中部,呈带状侵入企鹅山群第一、第四岩性段,为延东铜矿床的主要赋矿岩石;石英钠长斑岩只在延东铜矿区有少量出露,呈近东西向侵入于企鹅山群第一岩性段;花岗斑岩主要出露于矿区的东部及西部,呈带状侵入到企鹅山群第二、第三岩性段;闪长玢岩主要出露于矿区的中东部,在企鹅山群第一到第四岩性段均有出露。在钻孔中可以看到斜长花岗斑岩侵入到闪长玢岩(Shen et al., 2012)及石英钠长斑岩侵入到斜长花岗斑岩的现象。矿区内基性火山岩、花岗闪长斑岩、斜长花岗斑岩、石英钠长斑岩、闪长玢岩及铜矿体均呈近 EW 向分布,与

矿区构造线方向一致,这些说明 EW 向构造对成矿有控制作用(刘敏等,2009)。此外,在矿区西北部与

东北部,有花岗岩及闪长岩岩体侵入到侏罗系西山窑组中;在矿区南部有少量的二长花岗岩出露。

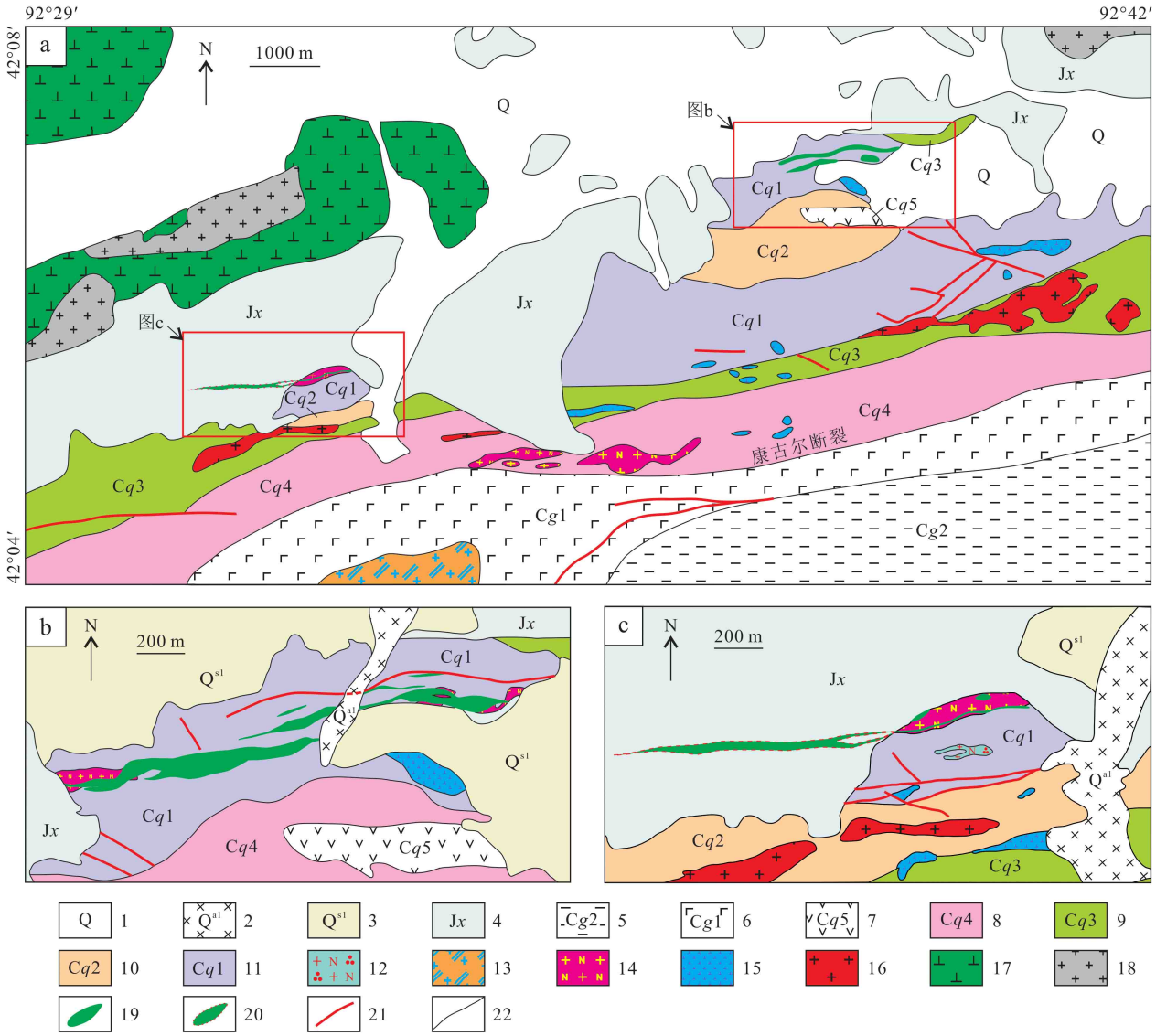


图 2 土屋-延东铜矿矿区地质图(a, 据申萍等,2010 修改)及土屋铜矿床(b)和延东铜矿床地质图(c, 据新疆地质矿产局第一地质大队,2012 修改)

1—第四系; 2—第四系洪冲积物; 3—第四系残坡积物; 4—侏罗系西山窑组; 5—石炭系干墩组第二岩性段; 6—石炭系干墩组第一岩性段; 7—石炭系企鹅山群第五岩性段; 8—石炭系企鹅山群第四岩性段; 9—石炭系企鹅山群第三岩性段; 10—石炭系企鹅山群第二岩性段; 11—石炭系企鹅山群第一岩性段; 12—石英钠长斑岩; 13—二长花岗岩; 14—斜长花岗斑岩; 15—闪长玢岩; 16—花岗斑岩; 17—闪长岩; 18—花岗岩; 19—铜矿体; 20—隐伏矿体投影位置; 21—断层; 22—地质界线

Fig. 2 Geological map of the Tuwu-Yandong orefield (a, modified after Shen et al., 2010) and geological map of the Tuwu Cu deposit (b) and Yandong Cu deposit (c, modified after Xinjiang No. 1 Geological Party, 2012)

1—Quaternary; 2—Quaternary alluvium deposit; 3—Quaternary residual and slope deposit; 4—Jurassic Xishanyao Formation; 5—The second lithologic unit of Carboniferous Gandun Formation; 6—The first lithological unit of Carboniferous Gandun Formation; 7—The fifth lithologic unit of Carboniferous Qi'eshan Group; 8—The fourth lithologic unit of Carboniferous Qi'eshan Group; 9—The third lithologic unit of Carboniferous Qi'eshan Group; 10—The second lithologic unit of Carboniferous Qi'eshan Group; 11—The first lithologic unit of Carboniferous Qi'eshan Group; 12—Quartz albite porphyry; 13—Monzonitic granite; 14—Plagiogranite porphyry; 15—Diorite porphyry; 16—Granite porphyry; 17—Diorite; 18—Granite; 19—Copper orebody; 20—The projection position of concealed orebody; 21—Fault; 22—Geological boundary

3 矿床地质特征

土屋铜矿床的铜矿体主要分布在企鹅山群地层中,约占矿体总量的 70%,另外约 30%的矿体分布在斜长花岗斑岩岩体中(图 2b)。矿区共圈出 3 个铜矿体,矿体呈透镜状,在平面上呈右行斜列状分布。三个矿体上部均为氧化性矿石,深度可达 80~120 m,倾角 60~80°,铜品位集中在 0.2%~0.6% 之间;下部均为原生矿石,最大斜深可达 755 m,倾角 70~83°,铜品位集中在 0.3%~1.0% 之间(新疆地质矿产局第一地质大队,2012)。

延东铜矿床中铜矿体主要分布在斜长花岗斑岩岩体中,约占矿体总量的 60%~65%,另外,约有 35%~40%的矿体分布在企鹅山群地层中。地表出露部分以 0.2% 为边界品位,圈定铜矿体长 900 m,最大厚度 24.9 m。共圈出 2 个隐伏铜矿体,均呈透镜状。主矿体长 3900 m,厚 10.0~61.5 m,倾角 68~80°,矿体单个样品铜的最高品位 2.2%,最低品位为 0.2%,主要集中在 0.2%~0.7% 之间(新疆地质矿产局第一地质大队,2012)。

土屋和延东铜矿床中矿物组合相似,金属矿物有黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿、辉铜矿、辉钼矿、闪锌矿、方铅矿、孔雀石、氯铜矿和赤铁矿等,脉石矿物有石英、方解石、绿泥石、绿帘石、绢云母、硬石膏、钠长石和磷灰石等。黄铜矿常呈浸染状、脉状产出,细脉浸染状较少,伴生有金、钼等矿化。

4 成矿期次

在详细的野外考察基础上,笔者重点对土屋和延东铜矿床 26 个钻孔(土屋铜矿床 7 个、延东铜矿床 19 个)的 2 万多米岩芯进行编录,取样 836 块(土屋铜矿床 275 块、延东铜矿床 561 块),共鉴定光薄片 438 片(土屋铜矿床 146 片、延东铜矿床 292 片)。在此基础上,笔者主要通过脉次穿插关系、蚀变矿物组合及矿物共生关系,并结合前人的研究成果重新划分了土屋和延东铜矿床的成矿期次。

4.1 土屋铜矿床的成矿期次

对于土屋铜矿床,笔者共划分为 3 个期次,从成矿的早期到晚期依次为:斑岩成矿期、叠加改造期及表生期(图 3)。

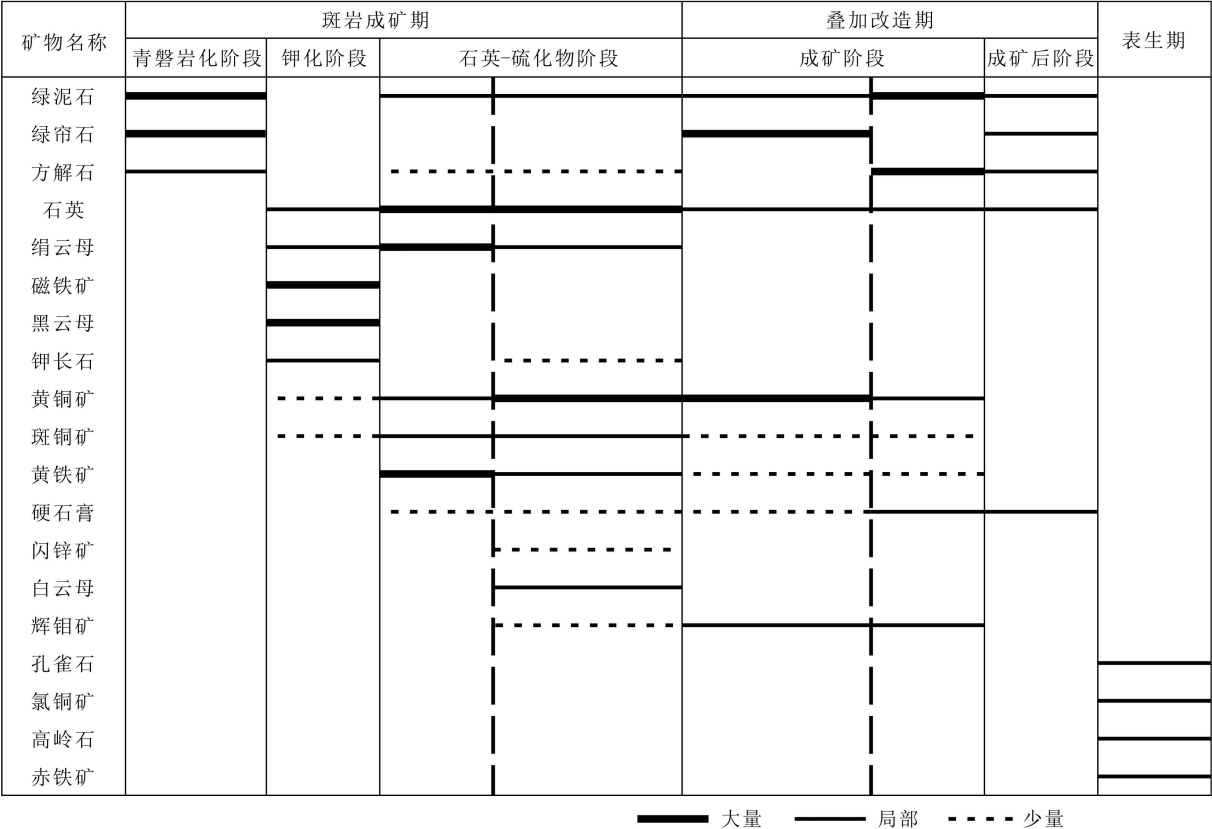


图 3 土屋铜矿成矿期次表

Fig. 3 Alteration and mineral paragenesis of the Tuwu Cu deposit

(1) 斑岩成矿期 该期包括青磐岩化阶段、钾化阶段及绢英岩化阶段。

青磐岩化阶段 该阶段的主要矿物有绿泥石、绿帘石,及少量的方解石,该阶段蚀变主要分布在企鵝山群地层中。在距离矿体较远的火山岩地层中,绿泥石化较发育,绿泥石呈浅绿色、片状分布;碳酸盐化、绿帘石化较弱,均呈浸染状分布,两种矿物的粒径一般都不超过 0.3 mm,以 0.03~0.1 mm 为主。斜长石未发生绢英岩化,比较新鲜。矿体周围 2 km 内的围岩中,绿帘石化较强,并出现绿帘石脉,且向矿体方向逐渐增多。矿体附近出现大量的绿帘石网脉(图 4a),脉宽 1~3 mm,这对于该区铜矿的勘探可能有一定的指示作用。

钾化阶段 土屋铜矿床中钾化较为发育,主要分布在斜长花岗斑岩及其临近的围岩中,以浸染状钾长石化(图 4b)、浸染状黑云母-磁铁矿化(图 4c)、磁铁矿-黑云母脉(图 4c)及石英-磁铁矿-黑云母脉(图 4d)等形式产出。其中,钾长石化主要分布在斜长花岗斑岩岩体中,钾化的斜长花岗斑岩呈红色,钾长石粒径 0.5~1 mm,最大可达 3 mm。浸染状黑云母-磁铁矿化主要分布在围岩中,黑云母呈长板状,粒径约 0.1 mm,排列无定向性,磁铁矿通常呈他形,粒径多为 0.03~0.1 mm。磁铁矿-黑云母脉主要分布在围岩中,磁铁矿呈半自形-他形,粒径约 0.03~0.1 mm,黑云母主要分布在磁铁矿脉两侧,粒径约 0.1 mm。石英-磁铁矿-黑云母脉在岩体及围岩中均有分布,磁铁矿常呈细粒集合体分布在石英中,而黑云母则主要分布在石英-磁铁矿脉的边部,粒径约 0.2~0.3 mm。

该阶段的黑云母被后期蚀变叠加,常发生弱-中等绿泥石蚀变,呈绿色、棕色,但依然保留着黑云母的晶型。

绢英岩化阶段 该阶段主要矿物有石英、黄铜矿、绢云母、黄铁矿等,并有少量的方解石、硬石膏、闪锌矿、绿泥石、白云母及斑铜矿等。该阶段可以细分为早、晚 2 个亚阶段。

早绢英岩化阶段主要见于地层围岩中,以大量出现黄铁矿、绢云母等为特征,并伴生有绿泥石、石英及少量的黄铜矿、斑铜矿。蚀变形成的绢云母颗粒较细,多在 0.05 mm 以下;石英常呈他形浸染状分布,粒径多为 0.1 mm 以下;黄铁矿、黄铜矿常呈浸染状、细脉状分布在绢英岩中(图 4e、4f),黄铁矿常呈自形-半自形,粒径多在 0.1~0.3 mm;黄铜矿、

斑铜矿常呈他形分布。

晚绢英岩化阶段以大量出现网脉状石英-黄铜矿、石英-黄铜矿-黄铁矿脉及石英-黄铁矿±黄铜矿脉为特征,且脉体常常切穿早阶段形成的黄铁绢英岩,使其呈角砾状分布在脉体之间(图 4e)。脉体中,黄铜矿常呈他形分布在石英颗粒之间(图 4g),黄铁矿呈自形-半自形分布在石英脉中,并伴生有少量的方解石、硬石膏等矿物,脉体边部常有白云母分布,粒径大多在 0.1 mm 左右,部分可达 0.3 mm。从矿体内部向外,逐渐由石英-黄铜矿脉过渡为石英-黄铁矿脉。部分石英脉样品中可见到微斜长石、黄铜矿及绿泥石等(图 4h)。

(2) 叠加改造期 该期可分为成矿阶段及成矿后阶段。

成矿阶段 该阶段也可细分为早、晚 2 个亚阶段。早阶段以出现大量的绿帘石、黄铜矿及少量的石英、白云母、绿泥石为特征,主要分布在围岩中。黄铜矿主要以绿帘石-黄铜矿±绿泥石±石英±白云母脉的形式出现,并可见到脉体切过青磐岩及钾化斜长花岗斑岩(图 5a、5b)的现象;此外,黄铜矿也可以浸染状、细脉浸染状的形式产出,并与绿帘石、绿泥石、石英和白云母等矿物共生(图 5c)。黄铜矿、绿帘石及石英均主要呈他形,粒径多在 0.05~0.1 mm 之间;白云母粒径集中在 0.1~0.2 mm 之间;有少数发育较好的黄铜矿-绿帘石-石英脉,脉宽可达 1~5 mm,黄铜矿、绿帘石常呈自形,粒径可达 1~2 mm。晚阶段矿物以方解石-硬石膏-绿泥石±黄铜矿组合(图 5d)为主,主要出现在岩体中,常常呈脉状切穿前期形成的矿脉,也常见其呈浸染状叠加于绢英岩化之上。

土屋矿区,辉钼矿化主要形成于叠加改造期,呈细脉状、浸染状产出(图 5e)。细脉状矿脉由辉钼矿和白云母组成,含辉钼矿细脉的矿石常沿细脉处断裂;浸染状辉钼矿化中,辉钼矿常与硬石膏、方解石、绿泥石及绿帘石等矿物伴生,呈自形、片状,粒径在 0.2~0.5 mm 之间。

成矿后阶段 该阶段矿物有绿帘石、绿泥石、方解石、石英及硬石膏等,呈脉状产出,矿物自形程度较好(图 5f)。

(3) 表生期 该期主要的矿物有高岭石、氯铜矿、孔雀石及赤铁矿等。在土屋铜矿区,地表附近矿体发生较强的高岭石化,矿石呈灰白色。

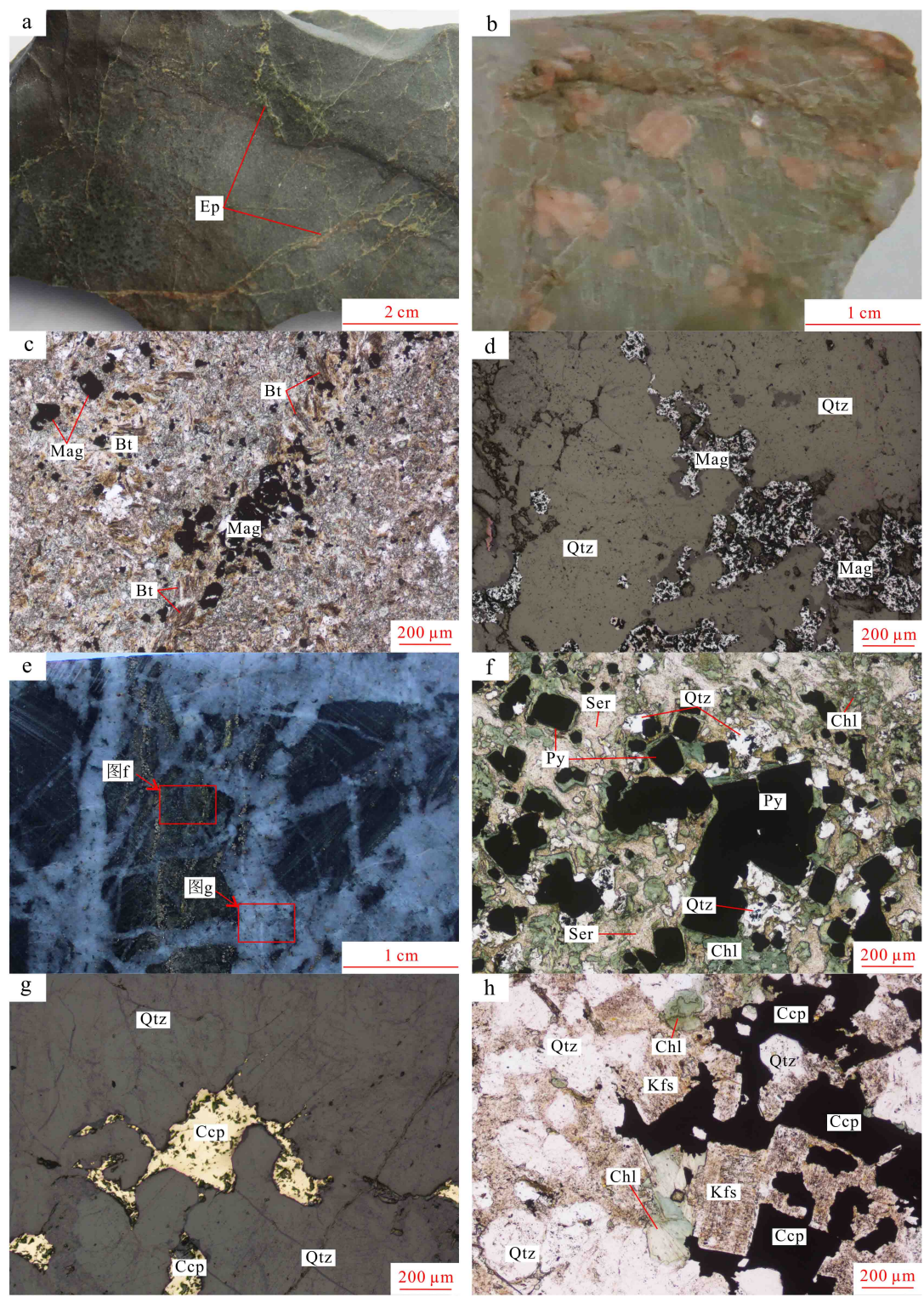


图 4 土屋铜矿手标本及镜下照片(斑岩成矿期)

a. 青磐岩化围岩中的网脉状绿帘石; b. 钾化(钾长石)的斜长花岗岩体; c. 钾化(黑云母)玄武安山质围岩中浸染状、脉状分布的磁铁矿-黑云母; d. 石英-磁铁矿脉; e. 网脉状的石英-黄铜矿脉切穿黄铁绢英岩; f. 黄铁绢英岩蚀变; g. 石英-黄铜矿脉; h. 石英-黄铜矿脉中的钾长石-黄铜矿-绿泥石组合

Ccp—黄铜矿; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Mag—磁铁矿; Bt—黑云母; Qtz—石英; Ser—绢云母; Py—黄铁矿; Kfs—钾长石

Fig. 4 Representative hand specimen photographs and microphotographs of the Tuwu Cu deposit (porphyritic-mineralization period)

a. Epidote stockwork in the propylitic wall rock; b. Plagiogranite porphyry with potassic (K-feldspar) alteration; c. Veinlike and disseminated magnetite-biotite assemblages in the potassic altered (biotite) host rock; d. Magnetite-quartz vein; e. Quartz-chalcopyrite stockwork cutting phyllic altered wall rock; f. Phyllic alteration; g. Quartz-chalcopyrite vein; h. K-feldspar-chalcopyrite-chlorite assemblages in quartz-chalcopyrite vein
Ccp—Chalcopyrite; Chl—Chlorite; Ep—Epidote; Mag—Magnetite; Bt—Biotite; Qtz—Quartz; Ser—Sericite; Py—Pyrite; Kfs—K-feldspar

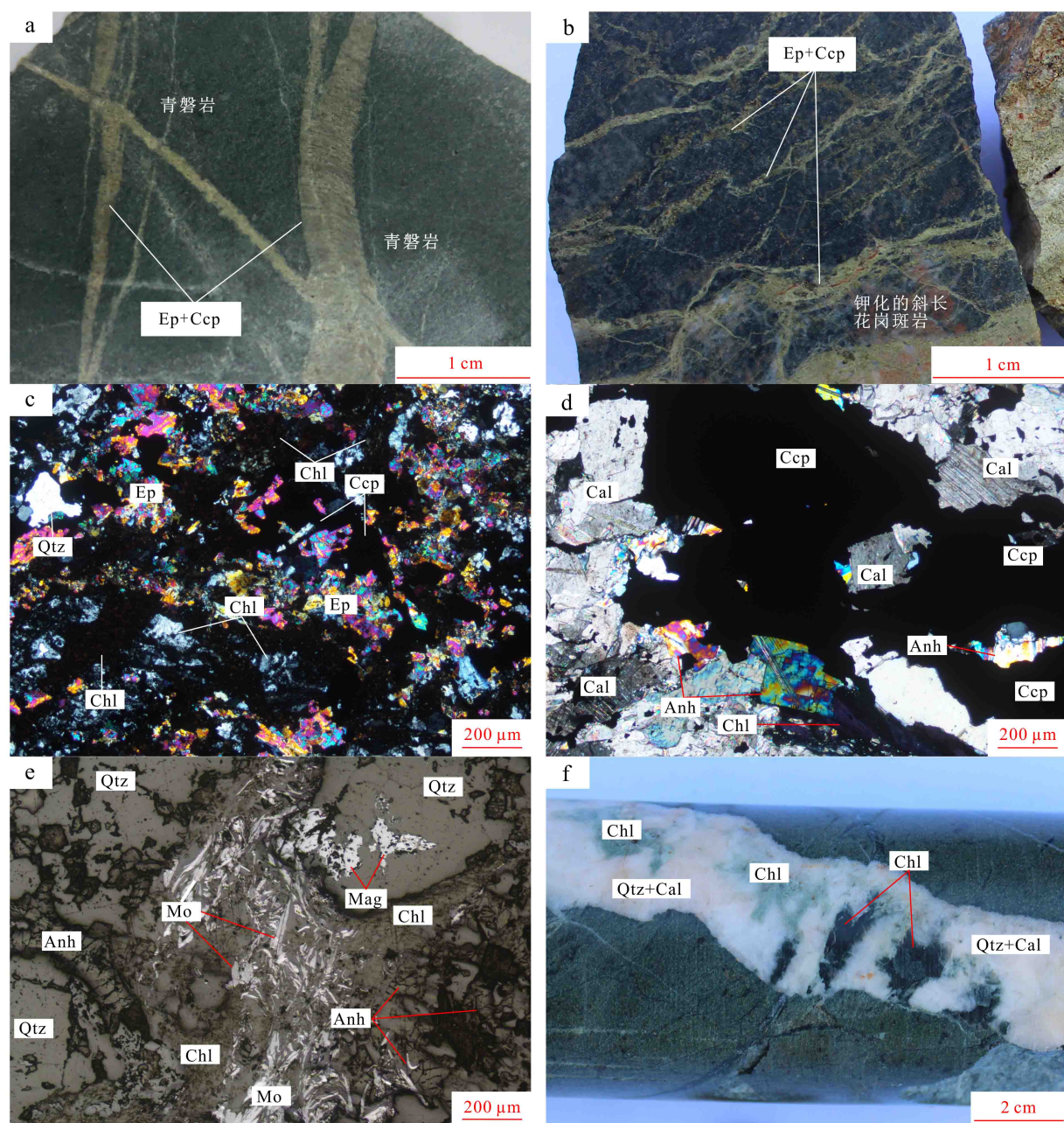


图 5 土屋铜矿的镜下及手标本照片(叠加改造期)

a. 绿帘石-黄铜矿脉切穿青磐岩化围岩; b. 钾化斜长花岗岩中的绿帘石-黄铜矿网脉; c. 浸染状绿帘石-黄铜-绿泥石-石英; d. 脉状方解石-硬石膏-黄铜矿-绿泥石; e. 辉钼矿-绿泥石-硬石膏组合交代石英-磁铁矿脉; f. 围岩中的绿泥石-石英-方解石脉
Ccp—黄铜矿; Anh—硬石膏; Cal—方解石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Mag—磁铁矿; Qtz—石英; Mo—辉钼矿

Fig. 5 Representative hand specimen photographs and microphotographs of the Tuwu Cu deposit (overlapped-mineralization period)
a. Epidote-chalcopyrite veins cutting the propylitic wall rock; b. Epidote-chalcopyrite stockwork in the potassic altered plagiogranite porphyry; c. Epidote-chalcopyrite-chlorite-quartz assemblage; d. Calcite-anhydrite-chalcopyrite-chlorite vein; e. Quartz-magnetite vein replaced by molybdenite-chlorite-anhydrite assemblage; f. Chlorite-quartz-calcite vein in propylitic host rock

Ccp—Chalcopyrite; Anh—Anhydrite; Cal—Calcite; Chl—Chlorite; Ep—Epidote; Mag—Magnetite; Qtz—Quartz; Mo—Molybdenite

4.2 延东铜矿床的成矿期次

延东铜矿也可划分为 3 个期次,从成矿早期到晚期依次为:斑岩成矿期、叠加改造期及表生期(图 6)。

(1) 斑岩成矿期 该期包括青磐岩化阶段、钾化阶段和绢英岩化阶段。

青磐岩化阶段 该阶段蚀变影响范围甚广,矿区外几公里的岩石均受到明显的蚀变,形成青磐岩。在该阶段,发生蚀变的岩石主要为企鹅山群地层,原岩为玄武岩、玄武-安山岩、安山岩及火山碎屑岩,蚀变后的岩石呈绿色、深绿色,常伴随着弱的硅化。石英钠长斑岩附近的青磐岩通常片理发育,多呈片状,岩石片厚度约 3~8 mm。蚀变矿物主要为绿帘石、绿泥石及少量的方解石,是由地层中的暗色矿物蚀变而来。其中,绿帘石主要以浸染状分布,呈半自形

-他形粒状,极少数由暗色矿物斑晶蚀变而来的绿帘石可呈自形,粒径可达 0.2~0.3 mm(图 7a);绿泥石同样呈浸染状分布,常为浅绿色,原岩中暗色矿物斑晶蚀变而形成的绿泥石,粒径可达 0.5~1 mm,而由原岩基质蚀变而来的绿泥石,粒径通常小于 0.2 mm;方解石较少,通常呈粒状。该阶段未见到明显的矿化现象。

钾化阶段 该阶段的主要矿物有石英、磁铁矿(图 7b),并有少量的黄铁矿、硬石膏、绢云母、黄铜矿、绿泥石、黑云母和绿帘石等矿物。磁铁矿通常呈磁铁矿-石英±硬石膏脉、磁铁矿-石英±绿帘石脉、磁铁矿-石英-黄铁矿±硬石膏脉的形式产出。磁铁矿颗粒多为他形,粒径通常小于 0.1 mm,多呈集合体形式产出。石英-磁铁矿脉两侧,通常出现绢云母-石英蚀变晕,部分脉体两侧会出现绿帘石-绿泥石蚀

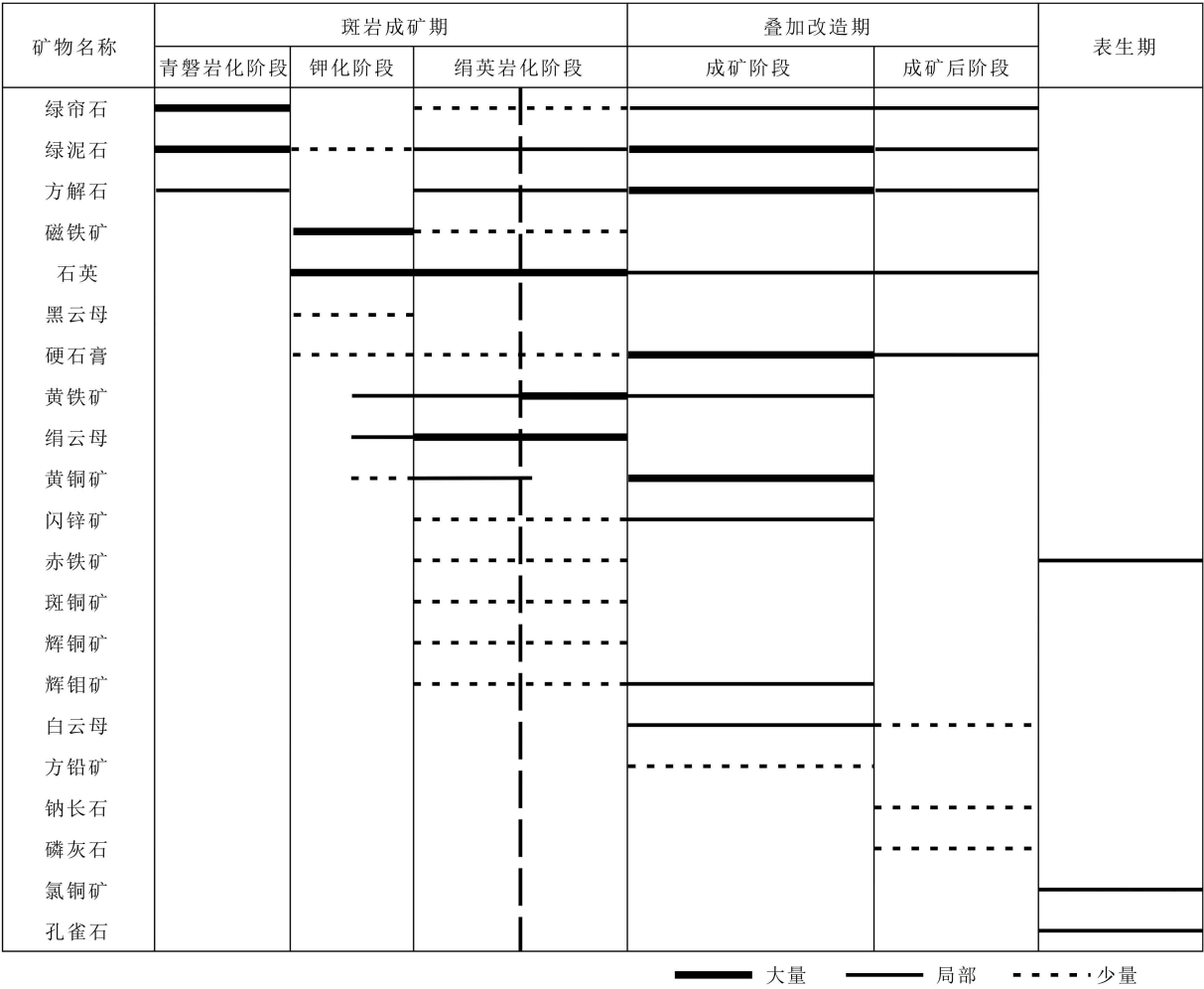


图 6 延东铜矿成矿期次表

Fig. 6 Alteration and mineral paragenesis of the Yandong Cu deposit

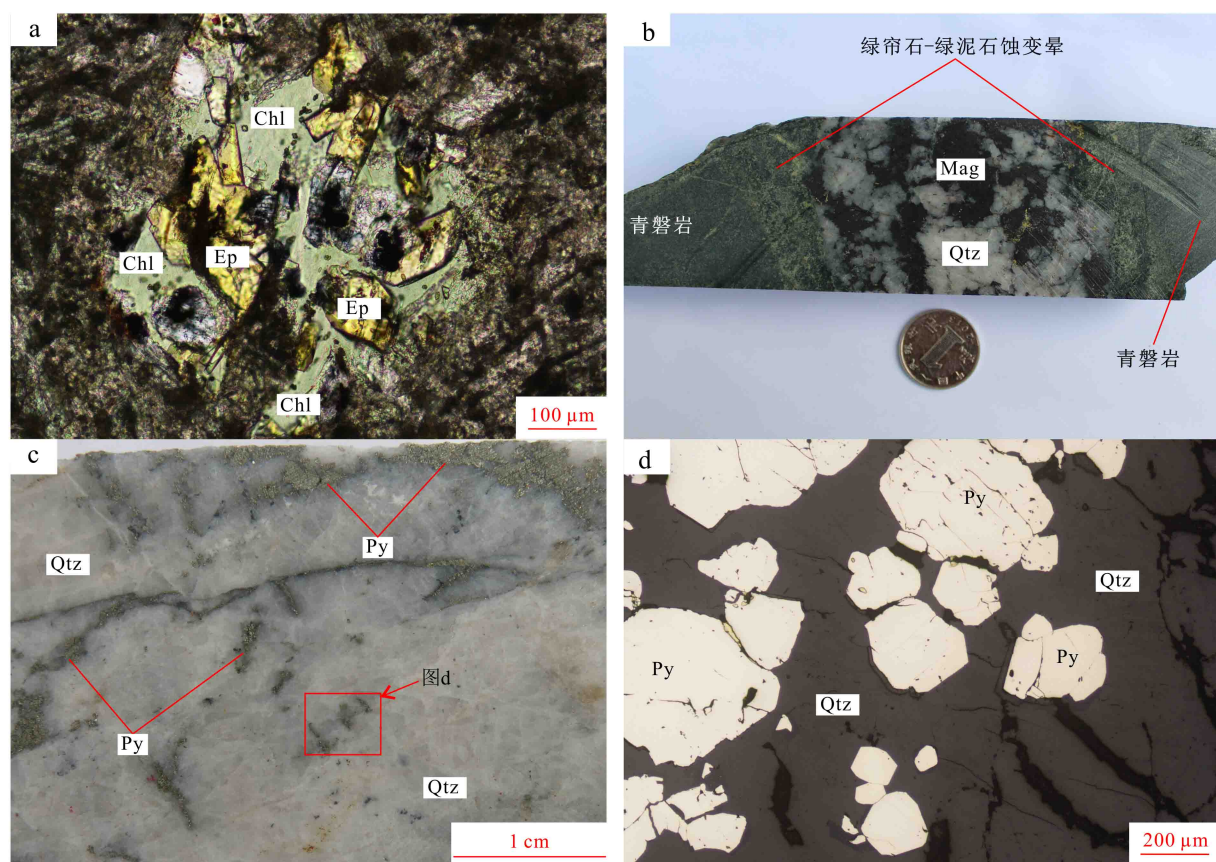


图 7 延东铜矿镜下及手标本照片(斑岩成矿期)

a. 青磐岩化过程中, 围岩中的暗色矿物被蚀变为绿帘石、绿帘石; b. 围岩中石英-磁铁矿脉, 脉两侧有绿帘石-绿帘石蚀变晕; c. 石英-黄铁矿脉; d. 石英-黄铁矿脉镜下照片

Chl—绿帘石; Ep—绿帘石; Mag—磁铁矿; Qtz—石英; Py—黄铁矿

Fig. 7 Representative hand specimen photographs and microphotographs of the Yandong Cu deposit (porphyritic-mineralization period)

a. Mafic mineral of wall rock altered to chlorite and epidote; b. Quartz-magnetite vein with alteration halos of epidote and chlorite cutting propylitic altered host rock; c, d. Quartz-pyrite vein

Chl—Chlorite; Ep—Epidote; Mag—Magnetite; Qtz—Quartz; Py—Pyrite

变晕。在磁铁矿-石英-黄铁矿±硬石膏脉中, 磁铁矿通常颗粒细小, 呈集合体状分布; 黄铁矿通常呈自形粒状分布在石英中, 粒径多在 0.1~0.5 mm 之间; 硬石膏多呈他形, 粒径 0.1~0.3 mm, 分布在磁铁矿周围或石英颗粒之间, 含量较少, 占矿脉的体积分数不到 3%。延东铜矿床的磁铁矿-石英脉较为发育, 通常出现在矿体下盘的围岩中, 钻孔中多见于 500 m 以下。

延东铜矿床的钾化蚀变较弱, 可能是由于后期蚀变的叠加与破坏所致。在延东铜矿床见到有绢英岩化叠加在石英-磁铁矿脉之上的现象; 且在斑岩系统中, 磁铁矿通常出现在钾化阶段 (Khashgerel et al., 2006; Silltoe, 2010), 因此笔者认为磁铁矿大量

出现的时间可以代表钾化蚀变的时间。Shen 等 (2014b) 认为, 在延东铜矿床黑云母化与磁铁矿化均出现在钾化阶段, 这也支持了笔者的观点。

绢英岩化阶段 该阶段的主要矿物有石英、绢云母、黄铁矿, 并有少量的黄铜矿、方解石等矿物。该阶段伴随着大规模的强绢英岩化蚀变, 主要发生在斜长花岗斑岩岩体及附近的围岩中。在斜长花岗斑岩中, 石英多呈椭圆形、圆形, 粒径可达 2~3 mm; 斜长石被完全蚀变, 形成绢云母、方解石等矿物, 绢云母分布在石英颗粒之间, 具有一定的定向性; 暗色矿物完全蚀变成绿帘石等矿物。在围岩中, 绢英岩化叠加在前期的青磐岩化之上, 绢云母呈浸染状分布在绿帘石等矿物颗粒之间。

该阶段可进一步细分为早绢英岩化阶段和晚绢英岩化阶段2个亚阶段:①早绢英岩化阶段以出现黄铜矿为特征,主要以石英-黄铜矿±黄铁矿脉形式出现,黄铜矿含量较少,主要呈浸染状分布在石英脉中,粒径小于0.1 mm;②晚绢英岩化阶段以出现大量的黄铁矿为特征,黄铁矿主要以石英-黄铁矿±硬石膏脉(图7c、7d)、黄铁矿-方解石-硬石膏-石英±绢云母脉的形式产出。石英-黄铁矿±硬石膏脉中黄铁矿颗粒多在1~3 mm之间,硬石膏多分布在石英颗粒之间,粒径多在0.8~1.2 mm之间;在黄铁矿-方解石-硬石膏-石英±绢云母脉中,黄铁矿多呈糖粒状,粒径0.5~1 mm,半自形为主,硬石膏、方解石、石英分布在黄铁矿颗粒之间,脉石矿物粒径较为悬殊,0.01~1 mm不等。

绢英岩化阶段受叠加改造期的影响较大。早绢英岩化阶段形成的铜矿化较弱且黄铜矿颗粒较细,经叠加改造后不易辨别,只能在很少的样品中清晰识别。从早绢英岩化阶段到晚绢英岩化阶段,黄铜矿减少,黄铁矿增多,呈现出渐变关系。

在该阶段,围岩中的石英-硫化物脉两侧通常有绢云母蚀变晕,绢云母呈定向排列,其排列方向与脉体延伸方向一致。在脉体两侧岩石中,有自形、粒状黄铁矿呈浸染状分布,粒径约0.5~1 mm。同时,在绢英岩化岩石中,常见有细小(0.1 mm以下)的闪锌矿、辉钼矿等硫化物。

(2) 叠加改造期 该期可进一步划分为成矿阶段及成矿后阶段等2个阶段。

成矿阶段 该阶段为延东铜矿床铜、钼的主要成矿阶段。主要矿物有黄铜矿、方解石、硬石膏和绿泥石,并有少量的黄铁矿、辉钼矿、石英、白云母、闪锌矿及绿帘石等矿物。该阶段蚀变在斜长花岗岩斑岩体及其附近企鹅山群地层中均有分布。

该阶段最具特征性的矿物组合为硬石膏-黄铜矿-方解石-绿泥石(图8a、8b),该组合通常交代前期石英-磁铁矿脉(图8c)、石英-硫化物脉(图8d、8e)及石英脉。另外,该阶段的黄铜矿还可以黄铜矿-绿帘石脉、硬石膏-黄铜矿-绿泥石-黄铁矿脉等形式产出。黄铜矿-硬石膏-方解石-绿泥石组合:在结晶较好的样品中,可见到黄铜矿-硬石膏-绿泥石-方解石共生的现象(图8a),黄铜矿、硬石膏及方解石等矿物自形程度良好,黄铜矿粒径可达3 cm以上,硬石膏粒径可达5 cm。该组合交代石英-磁铁矿脉时(图8c),磁铁矿常呈集合体状孤立分布在黄铜矿中;在交代石

英-黄铁矿脉(图8d、8e)及石英脉时,该组合常沿脉体中部分布,镜下可见黄铜矿包裹黄铁矿或沿黄铁矿颗粒裂隙分布的现象。黄铜矿-绿帘石脉:该类脉体出现在围岩中,黄铜矿与绿帘石共生,绿帘石常呈自形-半自形粒状。硬石膏-黄铜矿-绿泥石-黄铁矿脉:黄铜矿、黄铁矿呈浸染状分布在硬石膏中,黄铁矿常呈自形晶;脉中的硫化物及硬石膏常常定向分布。

该阶段中辉钼矿主要以细脉状和浸染状(图8f)的形式产出。细脉状辉钼矿脉由辉钼矿及少量的白云母组成,脉宽通常不超过1 mm,含辉钼矿细脉的样品常沿细脉处断裂;浸染状辉钼矿常与黄铜矿、硬石膏、方解石、绿泥石及绿帘石等矿物相伴产出。细脉状辉钼矿是辉钼矿的主要产出形式,在一些颗粒较大的辉钼矿中,可见到黄铜矿出溶的现象。

主成矿阶段矿脉中,通常不含或含极少量的石英,石英通常呈他形、粒状,其分布具有一定的定向性,绿泥石主要为叶绿泥石,深绿色,呈片状分布。黄铜矿脉及辉钼矿脉的两侧,常见白云母,粒径0.1~0.3 mm,常呈放射状、不规则状,定向性不明显。此外,叠加改造期还产出少量的闪锌矿、方铅矿、赤铁矿、斑铜矿、辉铜矿及黄铁矿等,可见到闪锌矿中出溶黄铜矿、方铅矿(图8g),以及斑铜矿-黄铜矿、斑铜矿-辉铜矿等共生现象。

成矿后阶段 该阶段主要矿物有石英、方解石、硬石膏、绿泥石、绿帘石等。常以石英-硬石膏-方解石脉、石英-方解石-绿帘石脉、石英-硬石膏-方解石-绿泥石脉(图8h)等形式产出,硬石膏、方解石、绿帘石、石英等矿物常呈自形-半自形产出,粒径通常为1~3 mm。绿泥石为叶绿泥石,深绿色,形态多样,可呈蠕虫状、片状产出,蠕虫状绿泥石粒径一般在0.1~0.2 mm之间。

(3) 表生期 主要矿物为氯铜矿、孔雀石、赤铁矿及一些黏土矿物等。与土屋铜矿床相比,延东铜矿区黏土化不明显。

5 讨论

5.1 蚀变与成矿

对于土屋和延东铜矿床的蚀变分带,前人已有较多的研究,并提出了各自的观点:芮宗瑶等(2002a)将土屋和延东铜矿床的蚀变划分为青磐岩化带、黑云母化带及石英-绢云母化带;李智明等

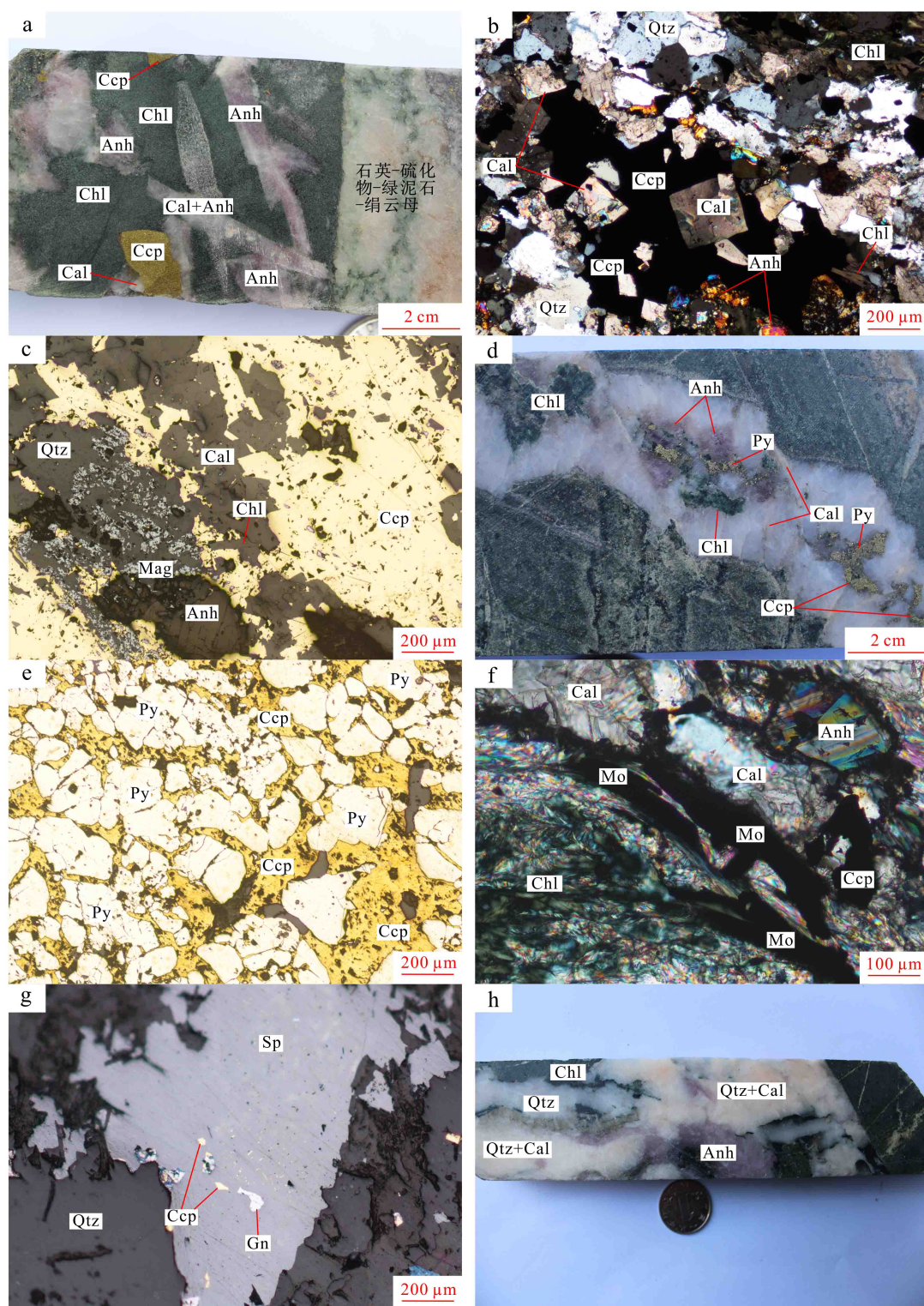


图 8 延东铜矿手标本及镜下照片(叠加改造期)

a. 硬石膏-绿泥石-黄铜矿-方解石脉切割早期石英脉; b. 黄铜矿-方解石-硬石膏-绿泥石组合镜下照片; c. 黄铜矿-方解石-硬石膏-绿泥石组合交代石英-磁铁矿脉; d. 硬石膏-黄铜矿-绿泥石-方解石交代石英-黄铁矿脉; e. 镜下黄铜矿交代黄铁矿; f. 辉钼矿与黄铜矿-硬石膏-绿泥石等伴生; g. 闪锌矿中出溶黄铜矿、方铅矿; h. 围岩中绿泥石-石英-方解石-硬石膏脉

Ccp—黄铜矿; Anh—硬石膏; Cal—方解石; Chl—绿泥石; Mag—磁铁矿; Qtz—石英; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Mo—辉钼矿

Fig. 8 Representative hand specimen photographs and microphotographs of the Yandong Cu deposit (overlapped-mineralization period)

a. Anhydrite-chlorite-chalcopryrite-calcite vein cutting quartz vein; b. Microphotograph of chalcopryrite-calcite-anhydrite-chlorite assemblage; c. Quartz-magnetite vein overprinted by chalcopryrite-calcite-anhydrite-chlorite assemblage; d. Quartz vein overprinted by chalcopryrite-calcite-anhydrite-chlorite assemblage; e. Pyrite replaced by chalcopryrite; f. Molybdenite intergrowth with chalcopryrite-anhydrite-epidote assemblage; g. Exsolution of chalcopryrite and galena within sphalerite; h. Chlorite-quartz-calcite-anhydrite vein in wall rock

Ccp—Chalcopryrite; Anh—Anhydrite; Cal—Calcite; Chl—Chlorite; Mag—Magnetite; Qtz—Quartz; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite; Gn—Galena; Mo—Molybdenite

(2006)将土屋和延东铜矿床的蚀变划分为强硅化带、黑云母化带、石英-绢云母带、泥化带、青磐岩化带; Han等(2006)将土屋铜矿床的蚀变划分为绢英岩化带、绿泥石-黑云母化带及青磐岩化带; Shen等(2014a, 2014b)将土屋铜矿床闪长玢岩中的蚀变划分为Ca-Na硅酸盐带、钾化带、青磐岩化带、绿泥石-绢云母化带、绢英岩化带及高级泥化带,将延东铜矿床闪长玢岩中的蚀变划分为钾化带、青磐岩化带、绿泥石-绢云母化带和绢英岩化带,并将两个矿床的斜长花岗斑岩中蚀变划分为钾化带、绿泥石-钠长石化带及绢云母化带等。

从前人的研究可以看出,土屋和延东铜矿床的蚀变分带与典型的斑岩铜矿有所不同。其原因可能为叠加改造期热液将斑岩系统钾化带中的黑云母、钾长石等矿物蚀变为绿泥石、绢(白)云母等矿物,从而使得钾化现象难以辨别;其次,当叠加改造期蚀变叠加在斑岩系统的绢英岩化蚀变之上时,会使后者普遍发生绿泥石蚀变,使其与典型的斑岩系统绢英岩化带特征不同。此外,土屋铜矿床斑岩成矿期蚀变特征较延东铜矿床保存完整,这与叠加改造成矿作用在延东铜矿床更为强烈相吻合。

从典型斑岩成矿特征来看,青磐岩化一般与钾化基本同时形成(前者稍晚),但在空间上有分带(前者一般位于后者的外围)。在土屋和延东铜矿床,均有钾化阶段的石英-磁铁矿脉切过青磐岩的现象,并在两侧青磐岩中形成绿帘石-绿泥石蚀变晕(图7b),这表明钾化可能晚于青磐岩化;此外,Shen等(2014a, 2014b)指出青磐岩化蚀变主要分布在闪长玢岩及其附近地层围岩中,早于铜矿化阶段,而钾化形成于铜矿化阶段,是由斜长花岗斑岩侵入所致(Shen et al., 2014b)。因此笔者认为,在土屋和延东铜矿床,青磐岩化阶段早于钾化阶段,两者可能不是同一期岩浆所形成。Shen等(2014b)得到闪长玢岩年龄为 (340.0 ± 3.0) Ma,早于矿区斜长花岗斑岩 $(339 \sim 332)$ Ma的形成时间,可能与两个矿区的青磐

岩化蚀变相关。

延东铜矿床叠加改造期是其主要的成矿期,一些表面看似典型斑岩铜矿中石英-硫化物矿脉的样品(图9a),在镜下可见到黄铜矿-硬石膏±绿泥石沿黄铁矿颗粒内裂隙分布的现象(图9b),并且在矿脉周围的绢英岩中,有明显的黄铜矿-硬石膏-绿泥石-方解石组合呈浸染状叠加在绢英岩化蚀变之上的现象(图9c),表明这些矿脉是黄铜矿-硬石膏-绿泥石-方解石组合交代晚绢英岩化阶段石英-黄铁矿脉而成,这些脉体中的黄铜矿依然形成于叠加改造期。在国内外著名的斑岩铜矿床中,铜主要形成于钾化阶段晚期(Proffett, 2003; Khashgerel et al., 2006; Yang et al., 2009; Shen et al., 2010; 张志等, 2014),或者形成于钾化和绢英岩化两个阶段(Cannell et al., 2005),这与延东铜矿床以黄铜矿-硬石膏-方解石-绿泥石组合为特征的叠加改造期成矿特征明显不同。而对于土屋铜矿床,绢英岩化时期是铜的主要成矿期,其次为叠加改造期。由此可见,土屋与延东铜矿床均在斑岩成矿和叠加改造成矿的共同作用下形成,这与前人(任秉琛等, 2002)所提出的土屋铜矿具有斑岩和普通热液矿床共同特征的观点有相似之处,均为斑岩-叠加改造成矿。本文作者在后续的工作中将进一步对叠加改造期矿化作用进行深入研究,查明流体性质和成矿机制。

5.2 辉钼矿 Re-Os 年龄及意义

在土屋和延东铜矿床,辉钼矿主要形成于铜的矿化阶段,因此辉钼矿 Re-Os 年龄被认为可以代表黄铜矿的成矿年龄(芮宗瑶等, 2002b; 张达玉等, 2010)。通过手标本及镜下观察,笔者发现辉钼矿通常与黄铜矿-硬石膏-方解石-绿泥石(±绿帘石)组合共生(图8f),表明辉钼矿主要形成于叠加改造期。

芮宗瑶等(2002b)用4件土屋铜矿床辉钼矿样品、3件延东铜矿床辉钼矿样品,得到2个铜矿床共同的Re-Os同位素等时线年龄为 (322.7 ± 2.3) Ma,张

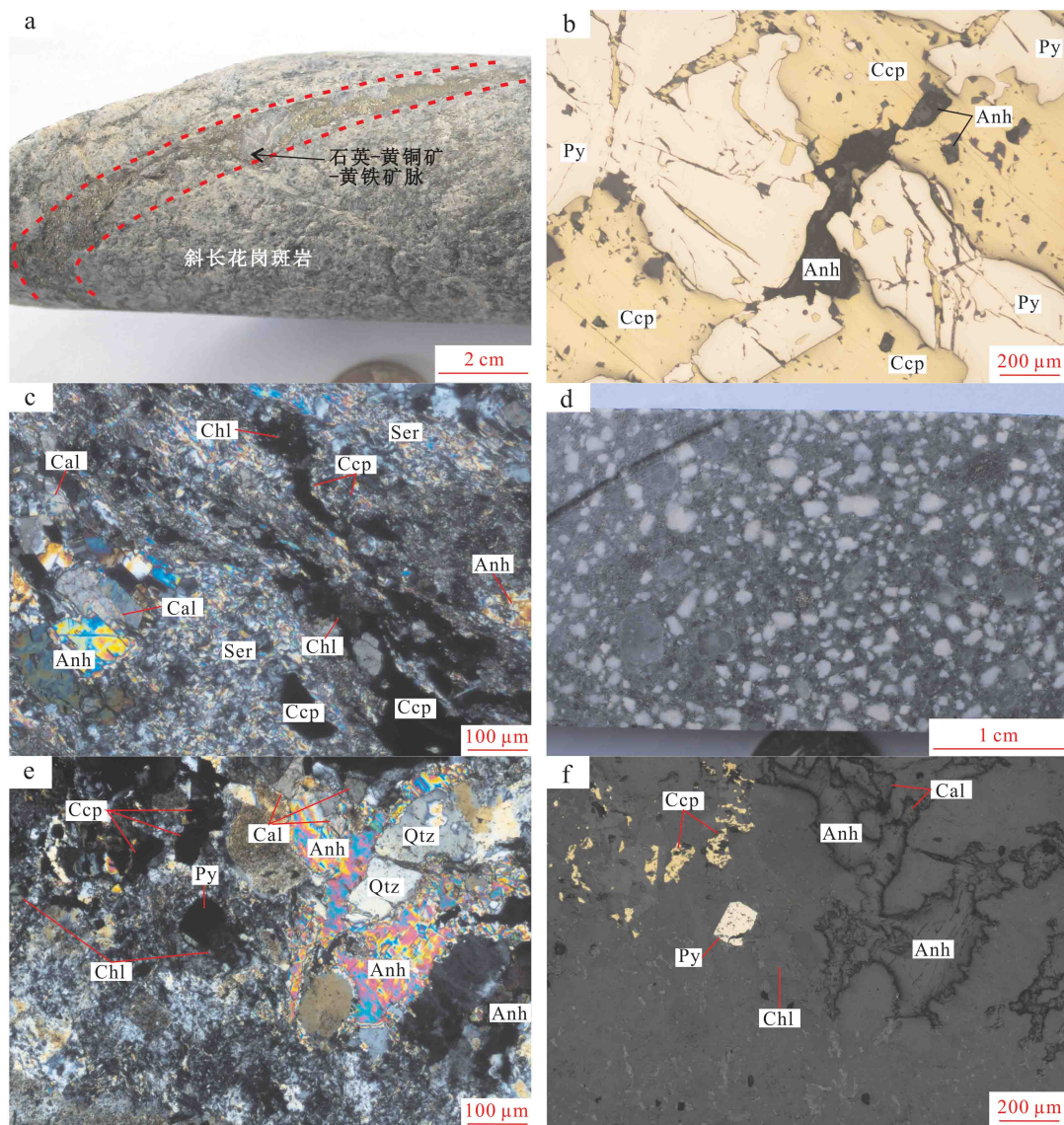


图 9 斜长花岗斑岩中石英-黄铁矿-黄铜矿脉(a, b, c)及延东铜矿的石英钠长斑岩(d, e, f)

a. 斜长花岗斑岩中石英-黄铁矿-黄铜矿脉; b. 石英-黄铁矿-黄铜矿脉中黄铜矿-硬石膏交代黄铁矿; c. 黄铜矿-硬石膏-绿泥石-方解石组合叠加在绢英岩化之上; d. 石英钠长斑岩; e, f. 石英钠长斑岩中黄铜矿-硬石膏-绿泥石-方解石组合
Ccp—黄铜矿; Anh—硬石膏; Cal—方解石; Chl—绿泥石; Qtz—石英; Ser—绢云母; Py—黄铁矿

Fig. 9 The quartz-pyrite-chalcopyrite vein in the plagiogranite porphyry (a, b, c) and the quartz albite porphyry from the Yandong Cu deposit (d, e, f)

a. Quartz-pyrite-chalcopyrite vein in the plagiogranite porphyry; b. Chalcopyrite-anhydrite assemblages cutting pyrite; c. phyllic alteration rock overprinted by chalcopyrite-anhydrite-chlorite-calcite assemblage; d. Quartz albite porphyry; e, f. Chalcopyrite-anhydrite-chlorite-calcite assemblage in the quartz albite porphyry

Ccp—Chalcopyrite; Anh—Anhydrite; Cal—Calcite; Chl—Chlorite; Qtz—Quartz; Ser—Sericite; Py—Pyrite

达玉等(2010)用 1 件延西铜矿床(属于延东铜矿床)辉钼矿样品, 得到其 Re-Os 同位素模型年龄为 (326.2 ± 4.5) Ma。由此得到土屋与延东铜矿床的成矿年龄主要为 326.2~322.7 Ma。

岩相学研究发现, 黄铜矿-硬石膏-绿泥石-方解

石-黄铁矿组合呈浸染状分布在石英钠长斑岩中(图 9e、9f), 表明叠加改造期成矿不早于石英钠长斑岩的侵入时期。此外, 在土屋和延东铜矿床, 一直被前人认为是致矿岩体的斜长花岗斑岩年龄集中在 339~332 Ma(刘德权等, 2003; 陈富文等, 2005; 侯广顺等,

2005,郭谦谦等,2010;张达玉等,2010;Shen et al., 2014a, 2014b;汪银宏等,2014),与成矿年龄相差6 Ma以上,而笔者在延东铜矿床首次得到的石英钠长斑岩(图9d)锆石 U-Pb 年龄为(323.6 ± 2.5) Ma (待刊),与成矿年龄在误差范围内一致,这说明石英钠长斑岩与叠加改造期矿化关系更为密切。由此,笔者认为326.2~322.7 Ma代表了土屋与延东铜矿床的叠加改造期成矿年龄。

Zhang 等(2008)用6件延东铜矿床辉钼矿样品得到模式年龄为340.7~333.9 Ma;秦克章等(2002)得到土屋-延东铜矿带蚀变绢云母 K-Ar 年龄为(341.2 ± 4.9) Ma,与前人所得到的斜长花岗斑岩年龄在误差范围内一致,且绢云母主要形成于斑岩成矿期的绢英岩化阶段,与该期铜矿化形成于同一阶段,因此笔者认为341.2~333.9 Ma可代表斑岩成矿期的成矿年龄。

综上所述,土屋与延东铜矿床均有2期成矿:前期为斑岩成矿,与斜长花岗斑岩的侵入相关,成矿年龄为341.2~333.9 Ma;后期为叠加改造成矿,与石英钠长斑岩的侵入相关,成矿年龄为326~321 Ma。

6 结 论

(1) 将土屋和延东铜矿床均划分为斑岩成矿期、叠加改造期及表生期等3个期次,两个矿床均为斑岩-叠加改造成矿。在土屋铜矿床,铜矿化形成于斑岩成矿期及叠加改造期,以斑岩成矿期为主;在延东铜矿床,铜矿化则主要形成于叠加改造期。

(2) 土屋和延东铜矿床的斑岩成矿期成矿年龄为341.2~333.9 Ma,叠加改造期成矿年龄为326.2~322.7 Ma,辉钼矿主要形成于叠加改造期。

(3) 石英钠长斑岩的侵入是导致土屋和延东铜矿床叠加改造期成矿的主要原因;叠加改造期蚀变会对斑岩成矿期蚀变产生叠加和破坏作用,使得后者特征变的不明显。

志 谢 野外工作得到了新疆地质矿产开发局第一地质大队、中科院广州地球化学研究所李登峰、中科院广州地球化学研究所陆万俭的帮助;室内研究工作得到了广州地球化学研究所赵联党、张维峰、许超的帮助;评审专家对论文初稿提出了宝贵的修改意见,谨致谢忱。

References

- Cannell J, Cooke D R, Walshe J L and Stein H. 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit[J]. *Econ. Geol.*, 100(6): 1171-1180.
- Chen F W, Li H Q, Chen Y C, Wang D H, Wang J L, Liu D Q, Tang Y L and Zhou R H. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of mineralization in Tuwu-Yandong porphyry copper mine, East Tianshan Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 247-254 (in Chinese with English abstract).
- Chen W M and Qu X M. 2002. Host rocks of Tuwu-Yandong (porphyry) copper deposit in Tianshan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 331-340 (in Chinese with English abstract).
- Gao J F, Zhou M F, Qi Liang, Chen W T and Huang X W. 2014. Chalcophile elemental compositions and origin of the Tuwu porphyry Cu deposit, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 66: 403-421.
- Guo H X. 2005. The fluid-inclusion characteristic and origin of Yandong porphyry copper deposit in eastern Tianshan[dissertation for master degree][D]. Supervisor: Cui B. Beijing: China University of Geosciences. 34p (in Chinese with English abstract).
- Guo Q Q, Pan C Z, Xiao W J, Qu J F, Ao S J, Zhang J E, Song D F, Tian Z H, Wan B and Han C M. 2010. Geological and geochemical characteristics of the Yandong porphyry copper deposits in Hami, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 28(4): 419-426 (in Chinese with English abstract).
- Han C M, Xiao W J, Zhao G C, Mao J W, Yang J M, Wang Z L, Yan Z and Mao Q G. 2006. Geological characteristics and genesis of the Tuwu porphyry copper deposit, Hami, Xinjiang, Central Asia[J]. *Ore Geology Reviews*, 29(1): 77-91.
- Hou G S, Tang H F, Liu C Q and Wang Y B. 2005. Geochronological and geochemical study on the wallrock of Tuwu-Yandong porphyry copper deposit, eastern Tianshan mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1729-1736 (in Chinese with English abstract).
- Khashgerel B E, Rye R O, Hedenquist J W and Kavalieris I. 2006. Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au system, South Gobi, Mongolia[J]. *Econ. Geol.*, 101(3): 503-522.
- Li W M, Ren B C, Yang X K, Li Y Z and Chen Q. 2002. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significance in eastern Tianshan region[J]. *Northwestern Geology*, 35(4): 41-64.

(in Chinese with English abstract).

- Li X M , Xia L Q , Xia Z C , Xu X Y , Ma Z P and Wang L S. 2006. Petrogenesis of the Carboniferous Qi 'eshan Group volcanic rocks in the east Tianshan[J]. Journal of Jilin University : Earth Science Edition , 36(3): 336-341 (in Chinese with English abstract).
- Li Z M , Zhao R F , Hou R P and Wang Q M. 2006. Geological characteristics of Tuwu-Yandong copper deposit in Xinjiang[J]. Geology and Prospecting , 42(6): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Q , Chen Y C , Wang D H , Tang Y L , Zhou R H , Wang J L , Li H Q and Chen F W. 2003. A discussion on problems related to mineralization of Tuwu-Yandong Cu-Mo orefield in Hami ,Xinjiang [J]. Mineral Deposits , 22(4): 334-344 (in Chinese with English abstract).
- Liu M , Wang Z L , Zhang Z H , Chen W S and Yang D. 2009. Fluid inclusion geochemistry of Tuwu porphyry copper deposit , eastern Tianshan in Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica , 25(6): 1446-1455 (in Chinese with English abstract).
- No. 1 Geological Party , Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration. 2012. The Exploration Report of Tuwu copper deposit , Hami , Xinjiang[R]. 5-15.
- Pan H D , Shen P , Chen G , Yang J T , Zhao Y J and Dai H W. 2013. Volcanic-plutonic complex , ore-forming rocks and their alterations in Tuwu porphyry Cu deposit of Xinjiang[J]. Mineral Deposits , 32(4): 794-808 (in Chinese with English abstract).
- Proffett J M. 2003. Geology of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper-gold deposit , Argentina[J]. Econ. Geol. , 98(1): 1535-1574.
- Qin K Z , Fang T H , Wang S L , Zhu B Q , Feng Y M , Yu H F and Xiu Q Y. 2002. Plate tectonics division , evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains , NW China[J]. Xinjiang Geology , 20(4): 302-308 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z , Peng X M , San J Z , Xu X W , Fang T H , Wang S L and Yu H F. 2003. Types of major ore deposits , division of metallogenic belts in eastern Tianshan , and discrimination of potential prospects of Cu , Au , Ni mineralization[J]. Xinjiang Geology , 21(2): 143-150.
- Qin K Z , Su B X , Sakyi P A , Tang D M , Li X H , Sun H , Xiao Q H and Liu P P. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. American Journal of Science , 311(3): 237-260.
- Ren B C , Yang X K , Li W M , Li Y Z and Wu J R. 2002. The

mineralization geological characteristics and the deposit comparison of Tuwu largest type porphyry copper deposit in eastern Tianshan Mountair[J]. Northwestern Geology , 35(3): 67-75 (in Chinese with English abstract).

- Rui Z Y , Wang F T , Li H H , Dong L H , Wang L , Jiang L F , Liu Y L , Wang L S and Che W S. 2001. New progress of Tuwu porphyry copper belt[J]. Geology in China , 28(2): 11-16 (in Chinese).
- Rui Z Y , Wang L S , Wang Y T and Liu Y L. 2002a. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu-Yandong porphyry copper deposits in eastern Tianshan mountains , Xinjiang[J]. Mineral Deposits , 21(1): 16-22 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y , Liu Y L , Wang L S and Wang Y T. 2002b. The eastern Tianshan porphyry copper belt in Xinjiang and its tectonic framework[J]. Acta Geologica Sinica , 76(1): 83-94 (in Chinese with English abstract).
- Shen P , Shen Y C , Pan H D , Wang J B , Zhang R and Zhagn Y X. 2010. Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit , West Junggar , northwest China : Petrology , alteration , and mineralization[J]. Econ. Geol. , 105(5): 947-970.
- Shen P , Dong L H , Feng J , Wang H , Xu X W , Xue C J and Qu X. 2010. Distribution , age and metallogenic characteristics of the porphyry copper deposits in Xinjiang , China[J]. Xinjiang Geology , 25(6): 1446-1455 (in Chinese with English abstract).
- Shen P , Shen Y C , Pan H D , Li X H , Dong L H , Wang J B , Zhu H P , Dai H W and Guan W N. 2012. Geochronology and isotope geochemistry of the Baogutu porphyry copper deposit in the West Junggar region , Xinjiang , China[J]. Journal of Asian Earth Sciences , 49 99-115.
- Shen P , Pan H D , Dong L H , Yang J S , Shen Y C , Dai H W , Guan W N and Zhao Y J. 2012. Caldera complex , hosted rocks and alteration of the Yandong porphyry copper deposit in eastern Tianshan , Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica , 28(7): 1966-1980 (in Chinese with English abstract).
- Shen P , Pan H D and Dong L H. 2014a. Yandong porphyry Cu deposit , Xinjiang , China-geology , geochemistry and SIMS U-Pb zircon geochronology of host porphyries and associated alteration and mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences , 80 : 197-217.
- Shen P , Pan H D , Zhou T F and Wang J B. 2014b. Petrography , geochemistry and geochronology of the host porphyries and associated alteration at the Tuwu Cu deposit , by reaction with mafic hostrock [J]. Mineralium Deposita , 49(6): 709-731.

- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105(1): 3-41.
- Wang F T, Feng J, Hu J W, Wang L, Jiang L F and Zhang Z. 2001. Characteristics and significance of the Tuwu porphyry copper deposit, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 28(1): 36-39 (in Chinese with English abstract).
- Wang J B and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23-31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y H, Xue C J, Liu J J, Wang J P, Yang J T, Zhang F F, Zhao Z N and Zhao Y J. 2014. Geochemistry, geochronology, Hf isotope, and geological significance of the Tuwu porphyry copper deposit in Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica sinica*, 30(11): 3383-3399(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S and Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304(4): 370-395.
- Yang Z M, Hou Z Q, White N C, Chang Z S, Li Z Q and Song Y C. 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1): 133-159.
- Zhang D Y, Zhou T F, Yuan F, Fan Y, Liu S and Peng M X. 2010. Geochemical characters, metallogenic chronology and geological significance of the Yanxi copper deposit in eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3327-3338 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Qin K Z, Ying J F, Xia B and Shu J S. 2004. The relationship between ore-forming processes and adakitic rock in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenic belt, eastern Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 259-268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z and Zhang Q. 2006. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry [J]. *Mineralium Deposita*, 41(2): 188-200.
- Zhang L C, Qin K Z and Xiao W J. 2008. Multiple mineralization events in the eastern Tianshan district NW China: Isotopic geochronology and geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 236-246.
- Zhang Z, Chen Y C, Tang J X, Li Y B, Gao K, Wang, Q, Li Z and Li J L. 2014. Alteration and vein systems of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1268-1286 (in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Yuan F, Zhang D Y, Fan Y, Liu S, Peng M X and Zhang J D. 2010. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 478-502 (in Chinese with English abstract).
- Zuo G C, Liang G L, Chen J, Zheng Y, Gao J B, Xing D C and Li S X. 2006. Late Paleozoic tectonic framework and evolution in the Jibaishan area, Qoltag, eastern Tianshan mountains, northwest China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(1-2): 48-57 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈富文, 李华芹, 陈毓川, 王登红, 王金良, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿田成岩年代精确测定及其地质意义[J]. *地质学报*, 79(2): 256-261.
- 陈文明, 曲晓明. 2002. 论东天山土屋-延东(斑岩)铜矿的容矿岩[J]. *矿床地质*, 21(4): 331-340.
- 郭红霞. 2005. 东天山延东铜矿包裹体特征及流体示踪研究(硕士论文)[D]. 导师: 崔彬. 北京: 中国地质大学. 34 页.
- 郭谦谦, 潘成泽, 肖文交, 曲军峰, 敖松坚, 张继恩, 宋东方, 田中华, 万博, 韩春明. 2010. 哈密延东铜矿床地质和地球化学[J]. *新疆地质*, 28(4): 419-426.
- 侯广顺, 唐红峰, 刘丛强, 王彦斌. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿围岩的同位素和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 21(6): 1729-1736.
- 李文明, 任秉琛, 杨兴科, 李有柱, 陈强. 2002. 东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义[J]. *西北地质*, 35(4): 41-64.
- 李向民, 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 马中平, 王立社. 2006. 东天山石炭纪企鹅山群火山岩岩石成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(3): 336-341.
- 李智明, 赵仁夫, 霍瑞平, 王庆明. 2006. 新疆土屋-延东铜矿田地质特征[J]. *地质与勘探*, 42(6): 1-4.
- 刘德权, 陈毓川, 王登红, 唐延龄, 周汝洪, 王金良, 李华芹, 陈富文. 2003. 土屋-延东铜矿田与成矿有关问题的讨论[J]. *矿床地质*, 22(4): 334-344.
- 刘敏, 王志良, 张作衡, 陈伟十, 杨丹. 2009. 新疆东天山土屋斑岩铜矿流体包裹体地球化学特征[J]. *岩石学报*, 25(6): 1146-1155.
- 潘鸿迪, 申萍, 陈刚, 杨俊骏, 赵云江, 代华五. 2013. 新疆土屋斑岩铜矿床火山-侵入岩体、成矿岩及其蚀变[J]. *矿床地质*, 32

- (4): 794-815.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. 新疆地质, 20(4): 302-308.
- 秦克章, 彭晓明, 三金柱, 徐兴旺, 方同辉, 王书来, 于海峰. 2003. 东天山主要矿床类型、成矿区带划分与成矿远景区优选[J]. 新疆地质, 21(2): 143-150.
- 任秉琛, 杨兴科, 李文明, 李有柱, 郭介人. 2002. 东天山土屋特大型斑岩铜矿成矿地质特征与矿床对比[J]. 西北地质, 35(3): 67-75.
- 芮宗瑶, 王福同, 李恒海, 董连慧, 王磊, 姜立丰, 刘玉琳, 陈伟十. 2001. 新疆东天山斑岩铜矿带的进展[J]. 中国地质, 28(2): 11-16.
- 芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生, 王义天. 2002a. 新疆东天山斑岩型铜矿带及其大地构造格局[J]. 地质学报, 76(1): 83-94.
- 芮宗瑶, 王龙生, 王义天, 刘玉琳. 2002b. 东天山土屋和延东斑岩铜矿时代讨论[J]. 矿床地质, 21(1): 16-22.
- 申萍, 董连慧, 冯京, 王核, 徐兴旺, 薛春纪, 屈迅. 2010. 新疆斑岩型铜矿床分布、时代及成矿特点[J]. 新疆地质, 28(4): 358-364.
- 申萍, 潘鸿迪, 董连慧, 杨俊弢, 申远超, 代华五, 关维娜, 赵云江. 2012. 新疆延东斑岩铜矿床火山机构、容矿岩石及热液蚀变[J]. 岩石学报, 28(7): 1966-1980.
- 王福同, 冯京, 胡建卫, 王磊, 姜立丰, 张征. 2001. 新疆土屋大型斑岩铜矿床特征及发现意义[J]. 中国地质, 28(1): 36-40.
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. 地质学报, 80(1): 23-31.
- 王银宏, 薛春纪, 刘家军, 王建平, 杨俊弢, 张方方, 赵泽南, 赵云江. 2014. 新疆东天山土屋斑岩铜矿床地球、化学年代学、Lu-Hf 同位素及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(11): 3383-3399.
- 新疆地质矿产局第一地质大队. 2012. 新疆维吾尔自治区哈密市土屋铜矿床勘探报告[R]. 5-15.
- 张达玉, 周涛发, 袁峰, 范裕, 刘帅, 彭明兴. 2010. 新疆东天山地区延西铜矿床的地球化学、成矿年代及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(11): 3327-3338.
- 张连昌, 秦克章, 英基丰, 夏斌, 舒建生. 2004. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 20(2): 259-268.
- 张志, 陈毓川, 唐菊兴, 李玉彬, 高轲, 王勤, 李壮, 李建力. 2014. 西藏多不杂富金斑岩铜矿床蚀变与脉体系统[J]. 矿床地质, 33(6): 1268-1286.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报, 26(2): 478-502.
- 左国朝, 梁广林, 陈俊, 郑勇, 高俊宝, 邢德超, 李绍雄. 2006. 东天山觉罗塔格地区夹白山一带晚古生代构造格局及演化[J]. 地质通报, 25(1-2): 48-57.