

# 新疆包古图地区斑岩型铜矿化特征和成矿元素 迁移规律初探\*

魏少妮<sup>1,2</sup> 朱永峰<sup>2</sup> 安芳<sup>3</sup>

(1 西安科技大学地质与环境学院 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测重点实验室, 陕西 西安 710054;

2 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 3 西北大学地质系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

**摘要** 新疆西准噶尔包古图地区斑岩型铜矿化发育, 蚀变矿化特征随岩体不同存在显著差异。文章通过岩石学、矿相学和微量元素地球化学的方法, 重点研究了Ⅲ号和Ⅴ号岩体的矿化特征和成矿元素迁移规律。结果表明: Ⅲ号岩体矿化中等, 以黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿为主, 呈浸染状, 硫化物脉少见; Ⅴ号岩体内部及其与围岩接触带产出大型铜矿床, 金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿, 呈浸染状和细脉-网脉状分布。Ⅲ号岩体角闪石英闪长岩形成于岩浆-热液过渡阶段, 与石英(花岗岩)闪长岩对比显示, 挥发分出溶过程中, Cs、Rb、Ba、Th、U 迁移进入挥发相, 稀土元素稳定未迁移, Cu、Bi 显著富集, Mo 和 Sb 被流体迁移带走, 形成热液矿化。Ⅴ号岩体钾化和硅化样品代表了不同的流体作用阶段, 与未蚀变样品对比显示, 在钾化阶段 Nb、Ta、Zr、Hf 性质稳定, 轻稀土元素发生显著迁移, 在硅化阶段轻稀土元素富集, 重稀土元素在岩浆-热液演化过程保持稳定。Cu、Mo 和 Bi 在钾化作用阶段富集成矿, Zn 和 Sb 则主要在晚期石英脉中富集。

**关键词** 地质学; 元素迁移; 热液蚀变; 斑岩铜矿; 包古图; 新疆

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

## Mineralization and elements migration characteristics of porphyry copper deposits in Baogutu area, Xinjiang

WEI ShaoNi<sup>1,2</sup>, ZHU YongFeng<sup>2</sup> and AN Fang<sup>3</sup>

(1 Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 3 State Key Laboratory for Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

### Abstract

Porphyry copper deposits are well developed in Baogutu area, west Junggar, Xinjiang. Different intrusions show remarkable difference in alteration and mineralization features. The authors studied emphatically the mineralization and ore-forming elements migration in intrusive body Ⅲ and Ⅴ by means of petrology, ore microscopy and trace element geochemistry. Intrusion Ⅲ has experienced a medium degree of mineralization, with plenty of disseminated pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite and minor sulfide veins. Intrusion Ⅴ has large-size porphyry copper deposits within the rock body or along its contact zone with wall rocks, containing plenty of chalcopyrite, pyrite and molybdenite, with disseminated and veinlet structure. Amphibole-quartz diorite from in-

\* 本文得到国家自然科学基金项目(41203032)和国际科技合作项目(2010DFB23390)联合资助

第一作者简介 魏少妮,女,1984年生,讲师,主要从事矿床地球化学研究。Email: weishaoni03@163.com

收稿日期 2013-01-30; 改回日期 2013-10-30。张绮玲编辑。

trusion III crystallized in the transition process from magma to hydrothermal solution, during which Cs, Rb, Ba, Th and U migrated into volatiles, REE was immobile, Cu and Bi were obviously concentrated, and Mo and Sb moved away with the fluid, producing hydrothermal mineralization. A comparative study of potassic altered samples, silicified samples and fresh samples from intrusion V indicates that Nb, Ta, Zr, Hf remained immobile during the potassic alteration while LREE moved until silicification. HREE remained stable during the whole magmatic-hydrothermal process. Cu, Mo and Bi precipitated during potassic alteration, whereas Zn and Sb were concentrated in the late stage quartz veins.

**Key words:** geology, elements migration, hydrothermal alteration, porphyry copper deposit, Baogutu, Xinjiang

热液作用过程中,成矿元素在流体相和矿物相之间迁移,宏观上表现为矿物相的变化,微观上表现为元素含量的相对变化(Hedenquist et al., 1994; Williams-Jones et al., 2005)。斑岩型矿床的成矿作用开始于岩浆过程向热液过程的转变阶段,成矿物质主要以挥发分的形式从岩浆体系中分离出来,在侵入体内部及其与围岩接触带产生热液蚀变和矿化(Richards, 2003; Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010)。从岩浆-热液过渡阶段到不同的热液作用阶段,成矿元素在流体相和各矿物相之间不断迁移演化(Urqueta et al., 2009)。因此,探讨不同成矿作用阶段中元素含量的相对变化,对成矿元素迁移规律以及斑岩矿床成矿作用过程的研究有益。

新疆西准噶尔地区矿产资源丰富,包古图地区产出斑岩型铜矿床(成勇等, 2006; 申萍等, 2009)。矿区范围内分布多个矿化侵入体(I~VIII号),各岩体之间蚀变矿化特征差别明显。V号岩体是矿体的赋存位置,记录了完整的岩浆-热液演化过程。III号岩体蚀变矿化较弱,保存了岩浆-热液过渡阶段的信息。本文在详细研究III号和V号岩体岩石类型和蚀变矿化特征的基础上,通过微量元素地球化学对比,探讨了不同成矿作用阶段Cu、Mo、Bi、Sb等元素的迁移特征,为斑岩体系成矿作用过程的研究和元素地球化学迁移规律的获得提供证据。

## 1 区域地质

新疆西准噶尔地区主要出露古生代地层,以火山碎屑沉积岩为主,含有大量火山岩夹层(图1)。早古生代地层主要分布在西准噶尔地区的南端,晚古生代地层在区内广泛分布,泥盆系在西部出露,岩性为凝灰岩、凝灰质粉砂岩、粉砂质泥岩、砂砾岩,以及碧玉岩和霏细岩夹层。石炭系是西准地区的主要盖

层,出露于哈图-包古图地区,包括太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组(图1)。

太勒古拉组分布于哈图山以东,达拉布特河两岸,下部为一套玄武岩、辉绿岩、凝灰岩、砂岩、粉砂岩,上部为凝灰质砂岩、粉砂岩、泥岩互层(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 沈远超等, 1993)。断裂以北的太勒古拉组是哈图、宝贝和萨尔托海金矿的主要赋矿地层。该组地层中古生物化石丰富(珊瑚、腕足、放射虫以及植物化石),时间跨度很大,从中泥盆世到早石炭世均有。同位素测年结果显示,断裂北侧宝贝金矿区凝灰岩的形成时代为 $(328.0 \pm 1.8)$  Ma(王瑞等, 2007),哈图金矿区玄武岩的形成时代为 $(315 \pm 4)$  Ma(Tang et al., 2012);断裂南侧玄武岩的形成时代为 $(357 \pm 5.4)$  Ma。包古图组出露于包古图河流域,为薄层凝灰质粉砂岩和灰绿色凝灰岩互层,其中含有大量浊流和滑塌堆积的灰岩、泥灰岩和生物碎屑灰岩透镜体及含砾杂砂岩,夹有少量火山岩,是包古图斑岩铜矿和部分金矿点的主要赋矿地层。底部灰岩中产腕足类、珊瑚和类化石,均为维宪期(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。包古图组中凝灰岩的形成时代为328~343 Ma(安芳等, 2009; 郭丽爽等, 2010),安山岩为 $(345.6 \pm 6.2)$  Ma(佟丽莉等, 2009)。希贝库拉斯组出露于包古图河东侧希贝库拉斯及其南面一带,以具有递变层理的含砾杂砂岩和具有变形层理的凝灰质粉砂岩为特征,二者互层出现,是包古图部分金矿点的直接赋矿地层,其中腕足类化石的时代为石炭纪巴什基尔期。凝灰岩中锆石U-Pb年龄为 $(336.3 \pm 2.5)$  Ma(郭丽爽等, 2010)。下石炭统太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组地层的岩性从凝灰岩和玄武岩、粉砂岩和凝灰岩夹含砾砂岩,到含砾砂岩,沉积粒度逐渐增大。

区域地质构造整体呈NE向,达拉布特断裂两

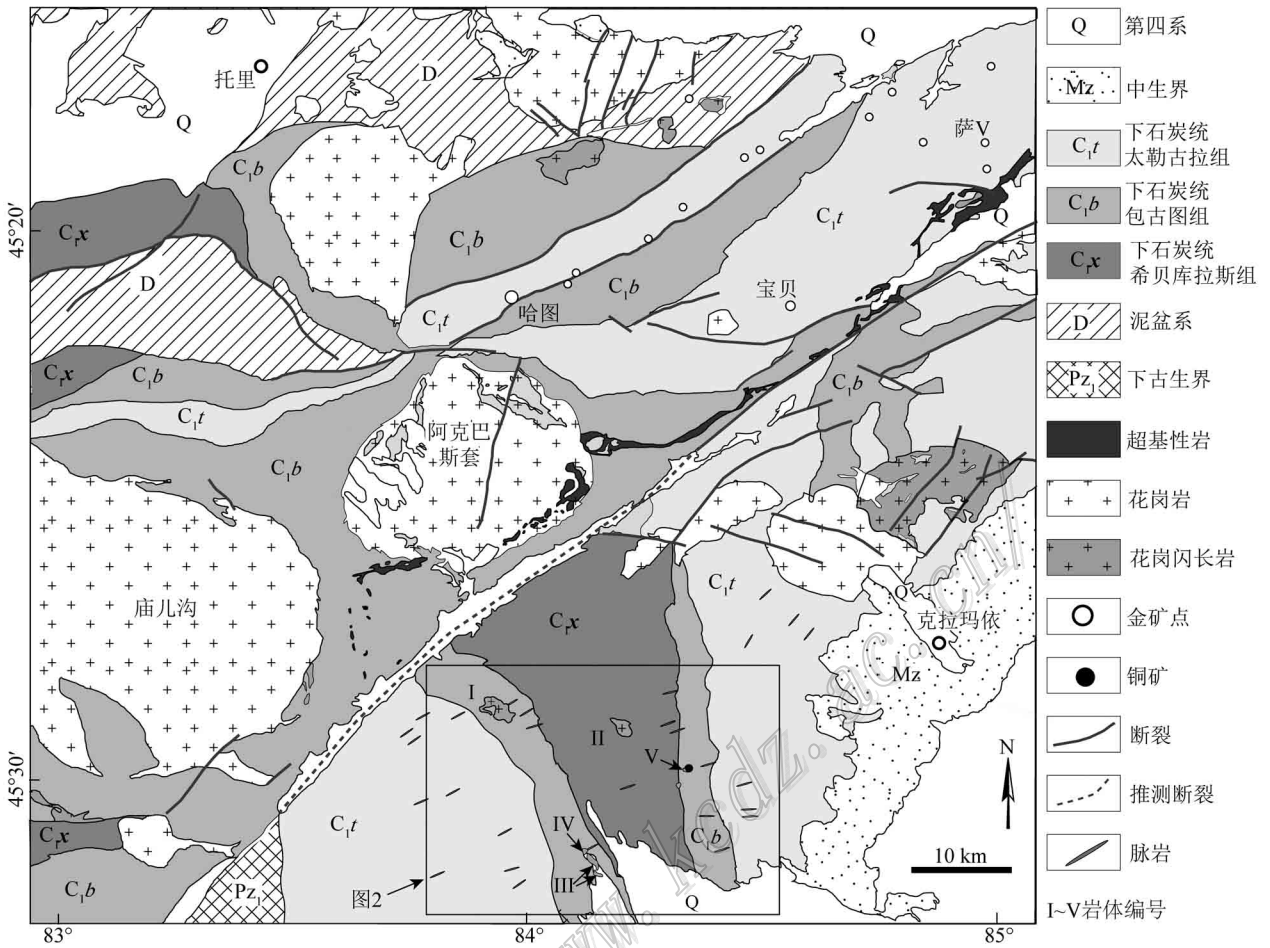


图1 西准噶尔地质简图(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)

Fig. 1 Simplified geological map of west Junggar (after Regional Geological Records of Xinjiang, 1993)

侧次级构造差别明显。北侧以NE向为主,如NE走向的安齐断裂和哈图断裂,地层亦呈NE向展布。南侧次级构造包括2期:早期为NS向,部分次级断裂及地层均呈NS向展布;晚期以NE向为主,出现大量NE向断裂和脉岩(图1)。

中酸性岩浆侵入到不同的地质构造单元之中。花岗岩基主要出露于达拉布特断裂以北和克拉玛依西北地区,例如阿克巴斯套岩体、庙儿沟岩体和克拉玛依北岩体,出露面积最为广泛,形成时代集中在295~310 Ma(韩宝福等, 2006),代表了西准噶尔后碰撞岩浆作用的时限。中酸性小岩株多集中在达拉布特断裂以南的包古图地区,形成时代集中在310~319 Ma,与区内的铜、金成矿作用密切相关(唐功建等, 2009; Liu et al., 2009; 魏少妮等, 2011; Shen et al., 2012)。中基性岩墙侵位于下石炭统火山-沉积地层和花岗岩基中,走向以NE为主,少数为NW

向或近SN向,侵位时代集中在241~321 Ma(李辛子等, 2004; Tang et al., 2010; Yin et al., 2010)。这些脉岩与西准地区的金矿化作用密切相关,例如哈图金矿区的辉绿岩脉与EW走向的蚀变岩型矿体平行分布(安芳等, 2007);阔个沙也金矿区的含金石英脉与区内NE向中酸性脉岩平行展布,矿化常赋存于脉岩中或脉岩周围的地层中(An et al., 2010)。

## 2 矿区地质

新疆包古图斑岩铜矿床的发现极大的促进了西准地区的找矿勘探和地质研究(成勇等, 2006)。在矿区范围内分布着多个矿化侵入体,这些侵入体岩性相似,以中酸性的花岗闪长岩、石英闪长岩和闪长岩为主,但蚀变和矿化程度差别很大,从而为斑岩体系不同演化阶段的研究提供了条件。

与NE走向的区域构造方位不同, 包古图斑岩铜矿区分布有早期NS向断裂、中期NE向断裂和晚期NS向断裂。早期NS向断裂规模较大, 延伸数千千米, 控制着区内中酸性岩体的分布, 形成时代最老。中期NE向断裂切割了早期NS向断裂和区内出露的部分斑岩体, 与大部分中酸性脉岩和包古图金矿中的含矿石英-硫化物脉平行, 是区内最主要的控矿构造。晚期NS向断裂规模较小, 多以裂隙的形式出现。由下石炭统火山沉积地层组成的褶皱构造, 轴部为希贝库拉斯组, 向两侧依次为包古图组和太勒古拉组, 褶皱轴向NS。与成矿相关的侵入体分别侵位于这3个地层组中(图2)。

I号岩体邻近达拉布特断裂, 侵位于包古图组地层中; II号岩体位于包古图地区中部希贝库拉斯组地层中, 呈菱形。这2个岩体内部矿化程度较弱。III号岩体分布于南部包古图组地层中, 出露面积1.76 km<sup>2</sup>, 包括北部的III-1和南部的III-2两部分。地表III-1号岩体矿化较好, 岩体北东侧孔雀石化明显, III-2号岩体深部矿化程度较强。III号岩体具有全岩矿化的特征, 硫化物呈浸染状分布于整个岩体及其邻近围岩中, 但品位很低, 金最高品位(质量分数, 下同)4.65 g/t, 铜最高品位0.94%, 绝大多数样品都小于边界品位(武警黄金第八支队内部资料)。

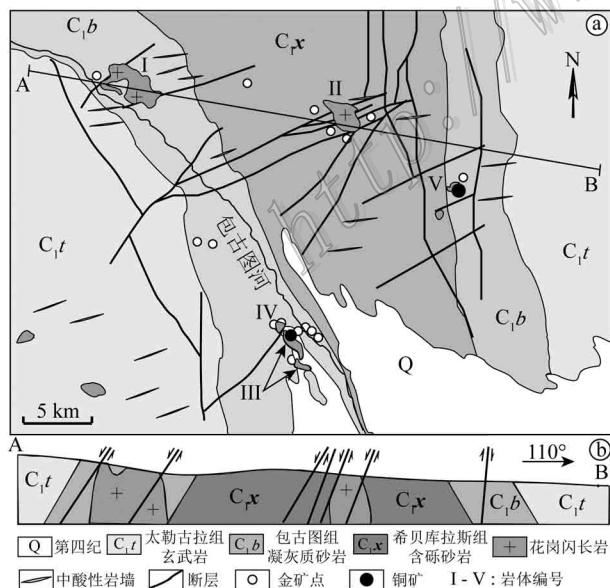


图2 包古图地区地质简图

(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)

Fig. 2 Simplified geological map of Baogutu area  
(after Regional Geological Records of Xinjiang, 1993)

V号岩体呈不规则钟状产出, 出露面积0.84 km<sup>2</sup>, 东侧为包古图组, 西侧出露希贝库拉斯组, 是包古图斑岩铜矿床的产出位置。矿体出露面积1100 m×800 m, 延深>800 m, 赋存于岩体及其与围岩地层接触带中。矿区北侧和东侧矿化较好, 高品位矿体出现在300~700 m的深度, 与热液角砾岩关系密切(申萍等, 2010)。铜金属量64万吨(平均品位0.28%), 伴生钼(1.8万吨)、金(14吨)和银(377吨)。

### 3 岩石学特征

III号岩体的岩性以花岗闪长岩和石英闪长岩为主, 主要由斜长石(50%~55%)、角闪石(0~10%)、黑云母(5%~15%)、石英(15%~25%)和钾长石(5%~10%)组成(图3a), 另有少量钛铁矿、榍石和金红石(5%)。局部位置(III-2号岩体北侧)发育角闪石英闪长岩, 角闪石体积分数25%~30%(图3b), 最高可达70%(图3c)。与其他中酸性侵入体中浅黄-浅绿色多色性的角闪石不同, 这类角闪石显示浅黄-浅棕色多色性(图3c), 在地球化学特征上具有很高的Mg<sup>#</sup>值(0.89), 与之共生的斜长石具有较高的An值(47)。V号岩体以花岗闪长(斑)岩和石英闪长(玢)岩为主, 主要由斜长石(50%~60%)、角闪石(10%~15%)、黑云母(5%~10%)和石英(5%~25%)组成, 少量磁铁矿、钛铁矿、榍石和金红石(图3d)。

### 4 蚀变和矿化

矿区范围内不同侵入体蚀变矿化特征差别明显。V号岩体是包古图斑岩铜矿床的产出位置, 蚀变矿化强烈, Cu平均品位0.28%, 伴生有Au(0.2 g/t)、Ag(2.8 g/t)和Mo(>0.01%)。III号岩体蚀变矿化较弱, 金属矿物呈浸染状分布于整个岩体中, 但品位很低。铜最高品位0.94%, 绝大多数样品都小于边界品位。

#### 4.1 III号岩体蚀变矿化特征

III号岩体蚀变类型多样, 包括绢云母化、绿泥石化、黑云母化、绿帘石化、白云母化、方解石化和黝帘石化, 不同的蚀变类型相互叠加。原生的自形角闪石蚀变分解为黑云母、石英和钠长石, 蚀变矿物粒度细小, 自形程度差, 以集合体的形式存在(图3b), 而原矿物的晶形被保留; 蚀变较弱时可见交代成因的

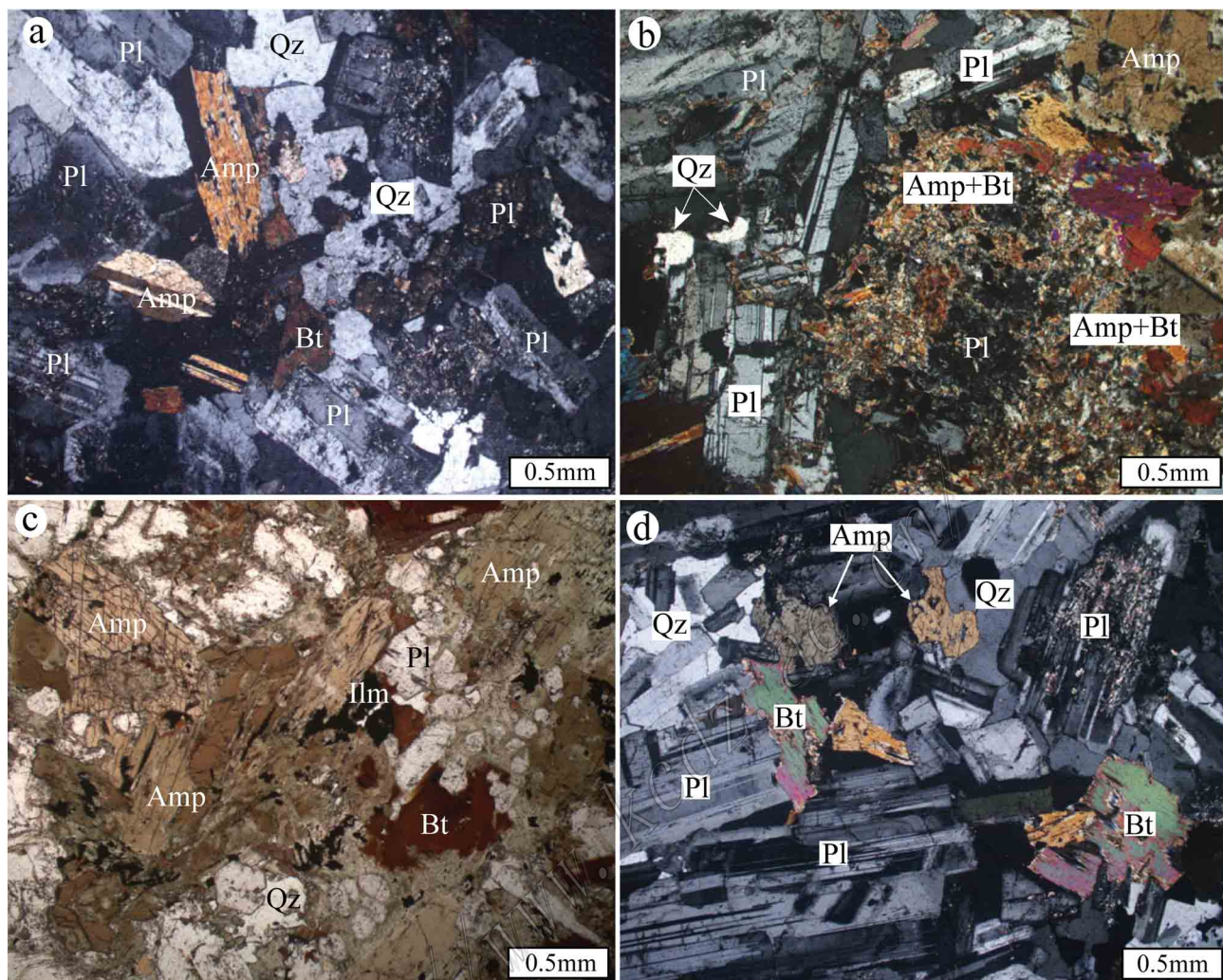


图3 Ⅲ号和Ⅴ号岩体岩石显微照片

a. Ⅲ号岩体石英闪长岩; b. Ⅲ号岩体角闪石英闪长岩, 部分角闪石被黑云母交代; c. 角闪石英闪长岩中的角闪石呈浅黄-浅棕色多色性; d. Ⅴ号岩体未蚀变花岗岩闪长岩. Pl—斜长石; Amp—角闪石; Bt—黑云母; Qz—石英; Ilm—钛铁矿

Fig. 3 Microphotographs showing mineral assemblages and textures of intrusion III and V

a. Microphotographs of quartz diorite from intrusion III; b. Microphotographs of amphibole-quartz diorite from intrusion III, amphibole partly replaced by biotite; c. Pleochroism of amphibole (light yellow-brown) in amphibole-quartz diorite; d. Microphotographs of unaltered granodiorite porphyry from intrusion V. Pl—Plagioclase; Amp—Amphibole; Bt—Biotite; Qz—Quartz; Ilm—Ilmenite

细小黑云母围绕原生角闪石分布,或是沿角闪石的解理浸染状产出。白云母化不连续,仅在局部分布,表现为原生的黑云母沿解理析出大量细小的磁铁矿,本身转变为白云母。方解石化较晚,叠加在绢云母化、绿泥石化和绿帘石化之上(图4a)。黝帘石化分布局限,为斜长石蚀变的产物(图4b)。蚀变矿物的脉体包括方解石脉、石英脉、绿泥石脉、绿帘石脉、浊沸石脉等(图4c, d),脉宽从<1 mm到几mm均有,局部不同的脉体相互穿切呈网状。偶见方解石-石英脉,宽3~4 cm。

Ⅲ号岩体具有全岩矿化的特征,硫化物种类多样,包括黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黝铜矿、斑铜矿、闪锌矿、辉钼矿、硫锑铁矿和银金矿,以前三者为主。黄铜矿是最主要的铜矿物,有3种产出方式:一是与黄铁矿、磁黄铁矿和毒砂等硫化物共生,呈浸染状分布于岩体和邻近的围岩中(图5a);二是与金红石和榍石等氧化物共生,浸染状分布于蚀变岩体中(图5b);三是呈乳滴状分布于闪锌矿中(图5c)。以第一种产出方式最常见。黝铜矿含量较少,可交代早期形成的黄铜矿和黄铁矿(图5d),或是与之共

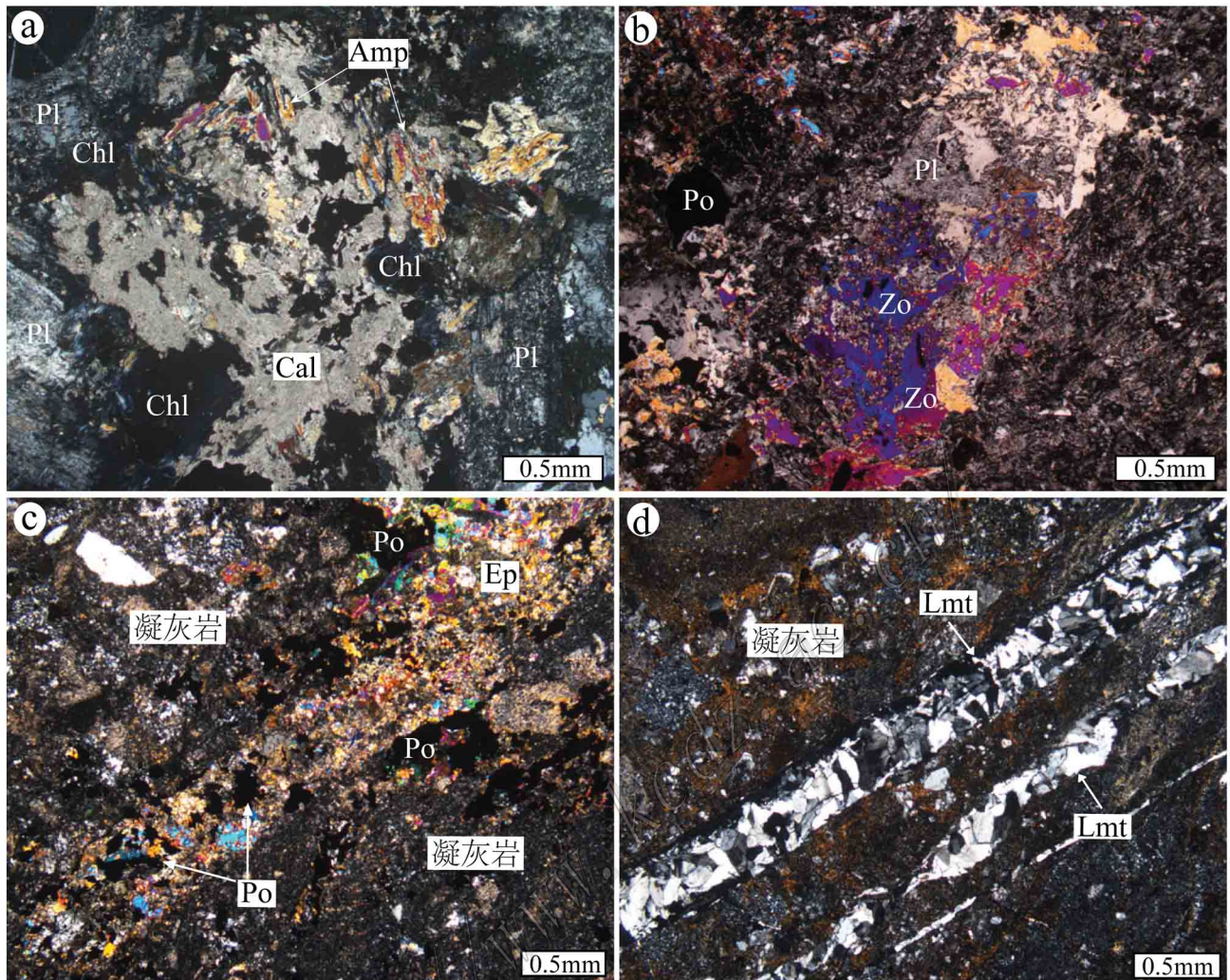


图4 III号岩体部分蚀变特征

a. 方解石化叠加在绢云母化和绿泥石化之上; b. 黝帘石交代斜长石; c. 蚀变凝灰岩中的绿帘石-磁黄铁矿脉; d. 蚀变凝灰岩中的浊沸石脉。

Pl—斜长石; Amp—角闪石; Chl—绿泥石; Cal—方解石; Zo—黝帘石; Ep—绿帘石; Lmt—浊沸石; Po—磁黄铁矿

Fig. 4 Alteration characteristics of intrusion III

a. Carbonatization superimposed on sericitization and chloritization; b. Zoisite replacing plagioclase; c. Epidote-pyrite vein in altered tuff;

d. Laumontite vein in altered tuff. Pl—Plagioclase; Amp—Amphibole; Chl—Chlorite; Cal—Calcite; Zo—Zoisite; Ep—Epidote;

Lmt—Laumontite; Po—Pyrrhotite

生(图5e)。斑铜矿少见,它交代早期黄铜矿(图5f)。辉钼矿仅在裂隙和少量石英细脉中可见(图5g)。金矿物为银金矿,含量很低,呈乳滴状被黄铜矿包裹(图5h)。除浸染状分布的金属矿物外,还可以见到少量硫化物脉,包括石英-黄铁矿脉(图5i)、石英-磁黄铁矿脉、石英-黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿脉、钠长石-黄铁矿脉、钠长石-绿帘石-黄铁矿-黄铜矿脉、绿帘石-黄铁矿-磁黄铁矿脉、方解石-黄铁矿脉等。

#### 4.2 V号岩体蚀变矿化特征

V号岩体蚀变强烈,包括钠长石化、阳起石化、

绢云母化、黑云母化、硅化、绿泥石化、绿帘石化、方解石化等。具有全岩矿化的特征,浅部主要是浸染状矿化,深部(250~300m)为浸染状和细-网脉状矿化,在岩体边部及其外接触带发育脉状矿化。金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿,其次为毒砂、磁黄铁矿、闪锌矿、辉铜矿、自然铜、蓝辉铜矿等。岩体内部常见硫化物脉,包括石英-黄铜矿-黄铁矿脉、石英-磁黄铁矿脉、石英-毒砂脉、石英-黄铜矿-辉钼矿脉等。

V号岩体的热液蚀变和矿化具有明显的分带

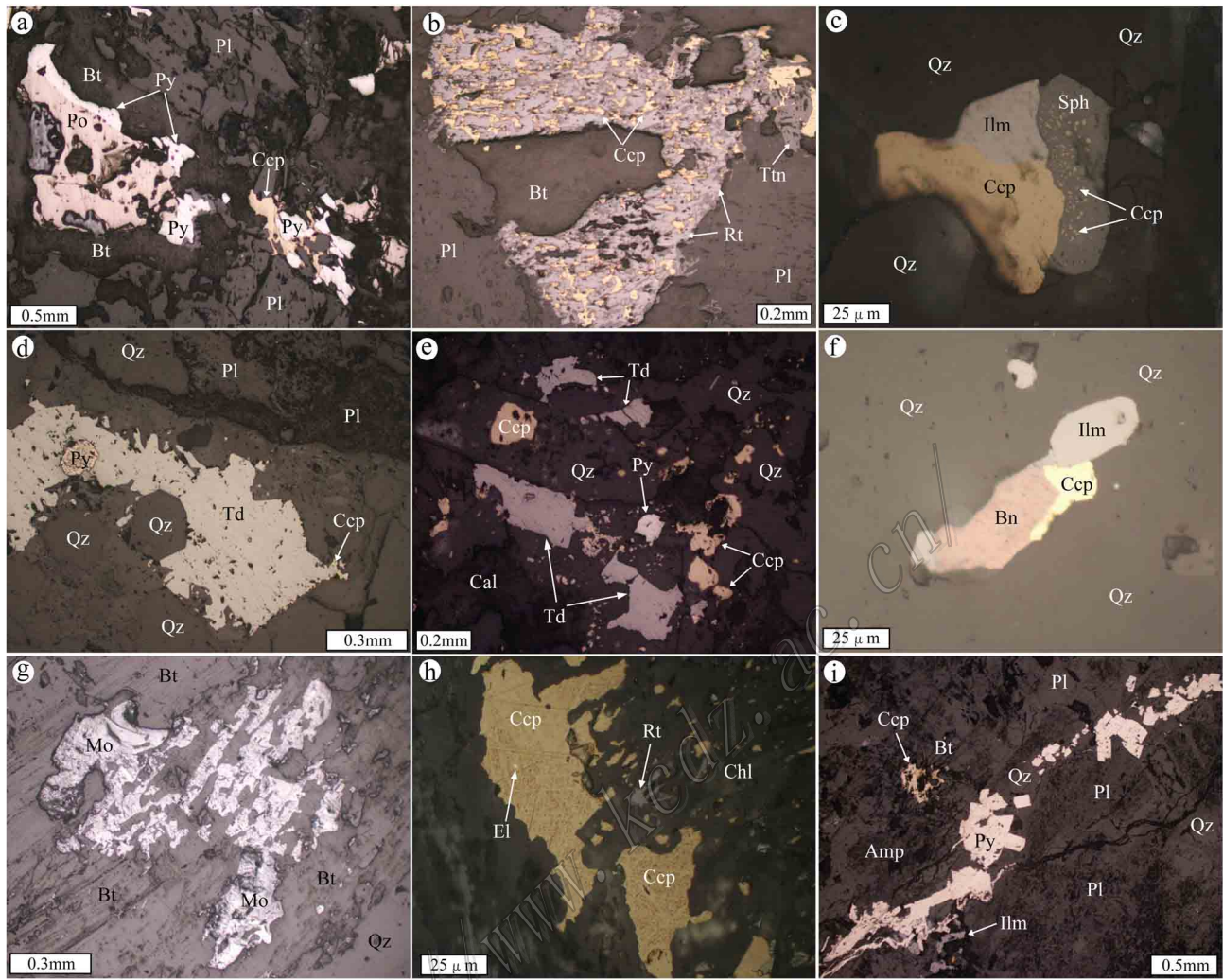


图 5 III号岩体中硫化物产出状态

a. 黄铜矿与黄铁矿和磁黄铁矿共生；b. 黄铜矿与金红石和榍石共生；c. 闪锌矿与浸染状黄铜矿和铁矿共生，内部出溶黄铜矿乳滴；d. 黝铜矿交代黄铜矿和黄铁矿；e. 黝铜矿与黄铜矿和黄铁矿共生；f. 斑铜矿交代黄铜矿，与铁铁矿共生；g. 黑云母颗粒中的浸染状辉钼矿；h. 乳滴状银金矿被黄铜矿包裹；i. 石英闪长岩中的黄铁矿脉。Bt—黑云母；Pl—斜长石；Rt—金红石；Ttn—榍石；Qz—石英；Chl—绿泥石；Amp—角闪石；Ccp—黄铜矿；Py—黄铁矿；Po—磁黄铁矿；Ilm—钛铁矿；Sph—闪锌矿；Td—黝铜矿；Bn—斑铜矿；Mo—辉钼矿；El—银金矿

Fig. 5 Modes of occurrence of sulfides in intrusion III

a. Chalcopyrite coexistent with pyrite and pyrrhotite; b. Chalcopyrite coexistent with rutile and titanite; c. Exsolution texture of sphalerite-chalcopyrite coexistent with disseminated chalcopyrite and ilmenite; d. Tetrahedrite replacing chalcopyrite and pyrite; e. Tetrahedrite coexistent with chalcopyrite and pyrite; f. Bornite replacing chalcopyrite and coexistent with ilmenite; g. Disseminated molybdenite in biotite. h. Droplet electrum enclosed by chalcopyrite; i. Pyrite vein in quartz diorite. Bt—Biotite; Pl—Plagioclase; Rt—Rutile; Ttn—Titanite; Qz—Quartz; Chl—Chlorite; Amp—Amphibole; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Po—Pyrrhotite; Ilm—Ilmenite; Sph—Sphalerite; Td—Tetrahedrite; Bn—Bornite; Mo—Molybdenite; El—Electrum

性。最早期为 Ca-Na 硅酸盐蚀变，表现为角闪石的阳起石化和斜长石的钠长石化，也可见细小的钠长石和阳起石脉，矿化较弱。该蚀变带多被晚期蚀变交代，边界不清。从岩体中心向外是广泛的钾硅酸

盐化带，分布在岩体内部，以强烈的黑云母化为特征。蚀变成因的黑云母通常粒度细小，围绕原生的角闪石和黑云母分布，也可以呈浸染状分布在蚀变岩石中(图 6a)，或是以次生云母脉的形式产出(图

6b)。与原生云母相比,蚀变成因的黑云母 Si、Mg、Cr 的含量较高,而 Fe 和 Ti 的含量较低(另文发表)。蚀变过程中释放出的 Fe 和 Ti,一方面以磁铁矿和金红石的形式沉淀,另一方面为黄铜矿、黄铁矿等金属矿物的析出提供条件。钾硅酸盐化带是矿体的集中分布区域,金属矿物大量结晶。矿物共生组合为:黑云母+石英+磁铁矿+黄铁矿+黄铜矿+磁黄铁矿+毒砂+黝铜矿+辉钼矿。黄铜矿通常与黄铁矿、磁黄铁矿和毒砂共生,呈浸染状或是硫化物脉的形式出现(图 7a ~ d);黝铜矿生成稍晚,充填在黄铜矿、黄铁矿和毒砂粒间,或是沿黄铜矿的边部生长

(图 7a, e)。辉钼矿呈浸染状分布在石英颗粒间(图 7f),或是以脉体的形式产出。绢云母化带叠加在钾硅酸盐化带之上,分布在岩体的内部和边缘,以斜长石被绢云母和石英取代为特征。矿物共生组合为:绢云母+石英+黄铁矿+黄铜矿。绢云母化不仅表现为斜长石颗粒局部或全部蚀变为绢云母,还以绢云母脉形式产出(图 6c)。在岩体的局部和边部发育硅化,硅化过程中原岩蚀变分解为细小的石英和黑云母颗粒,仅有少量斜长石残斑隐约可见,粗粒石英脉多见(图 6d)。硅化过程矿化较弱,主要为浸染状分布的黄铁矿和黄铜矿。典型矿物组合为:石英+

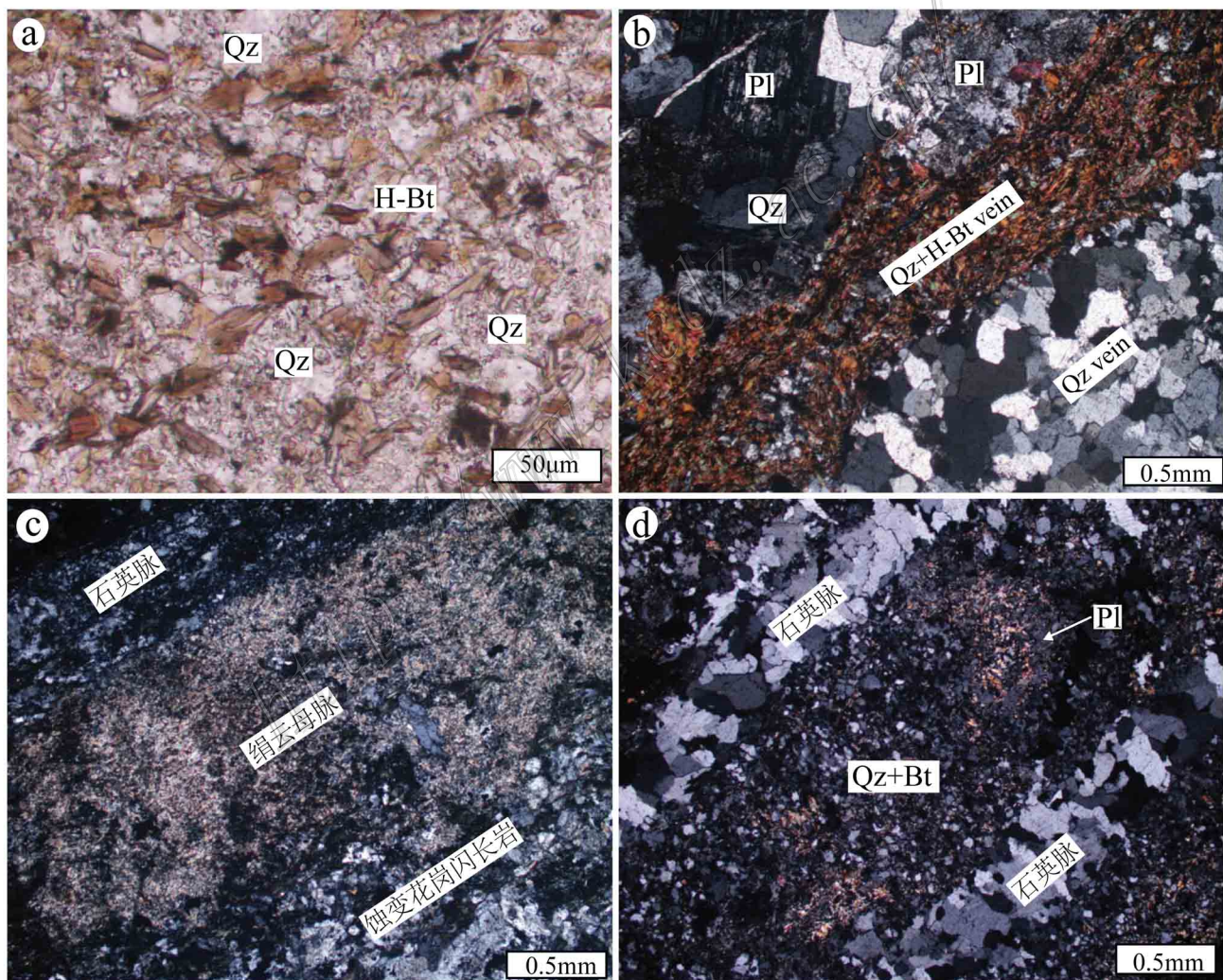


图 6 V号岩体部分蚀变特征

a. 浸染状分布的热液黑云母; b. 脉状分布的热液黑云母; c. 蚀变花岗闪长岩中的绢云母脉; d. 蚀变花岗闪长斑岩中的斜长石残斑和石英脉。Bt—岩浆成因黑云母; H-Bt—热液黑云母; Pl—斜长石; Qz—石英

Fig. 6 Alteration characteristics of intrusion V

a. Disseminated hydrothermal biotite; b. Hydrothermal biotite vein; c. Sericite vein in altered granodiorite; d. Plagioclase porphyroclast and quartz vein in altered granodiorite porphyry. Bt—Biotite; H-Bt—Hydrothermal biotite; Pl—Plagioclase; Qz—Quartz



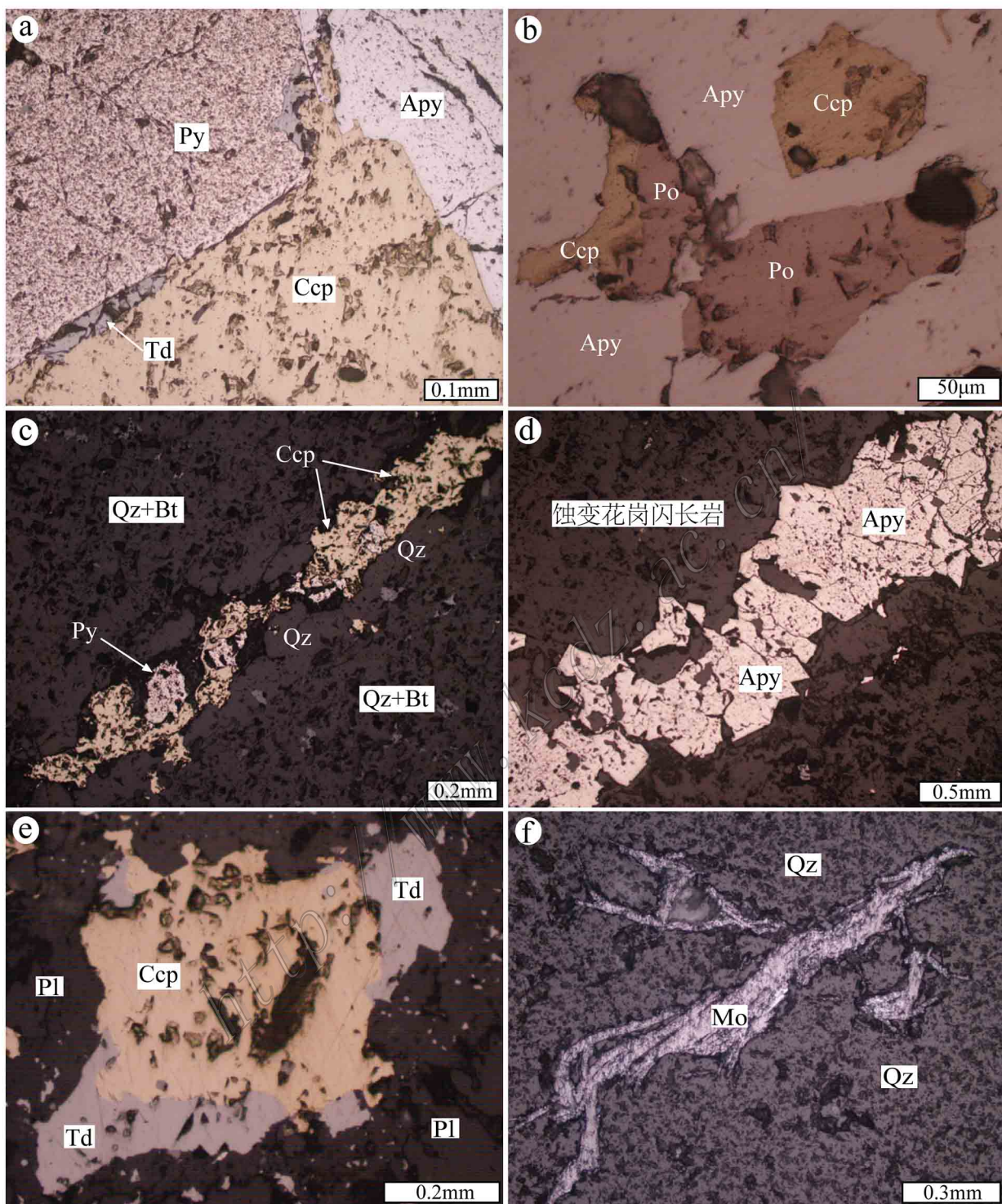


图7 V号岩体中硫化物产出状态

a. 黄铜矿与黄铁矿、毒砂和黝铜矿共生; b. 黄铜矿与磁黄铁矿共生被毒砂包裹; c. 石英砂岩中的黄铜矿-黄铁矿脉; d. 蚀变花岗闪长岩中的毒砂脉; e. 黝铜矿交代黄铜矿; f. 辉钼矿呈浸染状分布于石英粒间。Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Ccp—黄铜矿; Td—黝铜矿; Po—磁黄铁矿; Mo—辉钼矿; Bt—黑云母; Qz—石英; Pl—斜长石

Fig. 7 Modes of occurrence of sulfides in intrusion V

a. Chalcopyrite coexistent with pyrite, arsenopyrite and tetrahedrite; b. Chalcopyrite coexistent with pyrrhotite, enclosed by arsenopyrite; c. Chalcopyrite-pyrite vein in quartz sandstone; d. Arsenopyrite vein in altered granodiorite; e. Tetrahedrite replacing chalcopyrite; f. Molybdenite disseminates among quartz. Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Ccp—Chalcopyrite; Td—Tetrahedrite; Po—Pyrrhotite; Mo—Molybdenite; Bt—Biotite; Qz—Q—Quartz; Pl—Plagioclase

黑云母 + 黄铁矿 + 黄铜矿。

## 5 微量元素地球化学

在Ⅲ号岩体中挑选代表性石英(花岗)闪长岩和角闪石英闪长岩,在Ⅴ号岩体中分别挑选未蚀变花岗闪长岩、钾化花岗闪长岩和硅化花岗闪长岩进行微量元素分析(表1)。样品用清水洗净晾干,用不锈钢擂钵破碎至60~80目,再用玛瑙研钵研磨成200目。前处理(溶样)工作在北京大学地球与空间科学学院进行,测试在核工业地质研究院用Finnigen Mat ICP-MS完成,测试精度优于 $1 \times 10^{-6}$ 。

来自Ⅲ号和Ⅴ号岩体的未蚀变样品稀土元素总量较低(平均 $59.2 \times 10^{-6}$ ),具有一致的稀土元素配分模式:轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,整体右倾。轻重稀土元素分异弱( $(La/Yb)_N$ 平均4.95),无明显Eu异常(Eu平均1.07;图8a、c)。在微量元素蛛网图上,Nb、Ta、Ti亏损,Cs、Ba、Sr富集(图8e、g)。Ⅲ号岩体角闪石英闪长岩显示弱的Eu正异常( $\delta Eu = 1.19$ ),指示角闪石的分离结晶作用(图8b)。同时微量元素蛛网图上Ti的负异常消失,与样品中高的角闪石含量一致(图8f)。钾化花岗闪长岩稀土元素总量很低( $63.1 \times 10^{-6}$ ),配分模式整体右倾,但轻重稀土元素分异很弱( $(La/Yb)_N = 3.32$ ),弱Eu负异常( $\delta Eu = 0.80$ ;图8d)。微量元素蛛网图上Sr的正异常和Ti的负异常均有所减弱(图8h)。硅化花岗闪长岩稀土元素总量升高(平均 $95.8 \times 10^{-6}$ ),轻重稀土元素强烈分异( $(La/Yb)_N = 10.25$ ),无明显Eu异常( $\delta Eu$ 平均1.04;图8d)。与未蚀变样品一样,也显示出Nb、Ta、Ti的亏损,但Cs、Ba、Sr的富集趋势不明显(图8h)。

## 6 讨论

### 6.1 岩浆-热液过渡阶段的元素迁移

中酸性岩浆在上地壳侵位以后,受浮力作用逐渐向浅部迁移,压力的降低以及斜长石等矿物相的结晶,导致溶解在岩浆中的挥发分达到饱和,逐渐从熔体中分离出来,岩浆阶段向热液阶段过渡(Williams-Jones et al., 2005;罗照华等, 2009)。包古图中酸性侵入体在岩浆作用的晚期阶段,体系中的挥发分不断增加,在局部位置发生聚集,表现为含水矿物(角闪石)的大量结晶。富含角闪石的样品形

成于岩浆结晶晚期挥发分聚集过程中,代表了岩浆阶段向早期热液阶段的过渡。将这类样品(角闪石英闪长岩)与角闪石含量较低的样品(花岗闪长岩和石英闪长岩)进行对比(图9a),可以探讨岩浆作用晚期挥发分聚集过程中元素迁移的信息。

Cs、Rb、Ba、Th、U等大离子亲石元素相容性高,在流体中的活动性强,角闪石英闪长岩中这些元素的亏损,指示它们进入到残余挥发相。REE通常以类质同象的形式赋存在矿物晶格中,Ⅲ号岩体两类样品(角闪石英闪长岩与花岗闪长岩)的稀土元素保持了很好的稳定性,指示挥发分出溶过程中稀土元素并未发生明显迁移。Nb、Ta、Zr、Hf的含量主要受榍石和锆石等矿物相控制,角闪石英闪长岩中榍石和锆石等矿物含量极低,导致这些元素亏损。Cu、Zn、Mo、Sb、Bi等成矿元素的含量变化很大,整体富集于富含角闪石的样品中,其中Bi元素的富集趋势最明显,Cu和Zn弱富集,Sb和Mo弱亏损(图9a)。这一特征说明,挥发分出溶过程中成矿作用已经开始,早期阶段的成矿流体有助于Cu和Bi的矿化,Mo和Sb被残余挥发分迁移带走。中酸性岩浆挥发分的出溶过程携带成矿元素进入流体相,但是角闪石的大量结晶强烈消耗了体系中的水,部分抑制了成矿流体形成,导致成矿作用停滞在岩浆-热液过渡阶段,难以形成具有经济价值的矿床。

### 6.2 钾化过程中的元素迁移

岩浆-热液体系持续演化,分离出独立的成矿流体,产生广泛的蚀变矿化作用。包古图斑岩铜矿床产于Ⅴ号岩体,对比不同类型蚀变样品与未蚀变样品,可以获得热液演化过程中元素迁移的信息。

钾化蚀变在流体作用的早期阶段开始,生成大量热液成因黑云母(图6a、b)。对比钾化样品和未蚀变花岗闪长岩样品发现(图9b),Cs、Rb、Ba、Sr等活性较强的元素亏损或富集趋势差别很大,主要受矿物相的控制。Sr通常呈二价阳离子( $Sr^{2+}$ )置换 $Ca^{2+}$ 进入斜长石和角闪石的晶格,钾化过程中角闪石被黑云母交代,斜长石被钾长石交代,导致Sr活化进入成矿流体。与之相反,Cs和Rb主要赋存在钾长石和黑云母中,在钾化过程中显著富集。Ba在黑云母中的含量较高,钾化样品中Ba亏损,指示Ba被热液流体迁移带走,进入下一蚀变阶段。LREE(例如La、Ce)轻微亏损,HREE保持稳定。表明钾化过程对HREE的影响很小,LREE活性较强,被流体迁移带走。Nb、Ta、Zr、Hf等高场强元素在钾化过

表 1 包古图Ⅲ号和 V 号岩体微量元素分析结果( $w(B)/10^{-6}$ )  
Table 1 Representative trace element compositions of Baogutu intrusion Ⅲ and V ( $w(B)/10^{-6}$ )

组分	Ⅲ号岩体										V号岩体							
	花岗岩长岩		石英英长岩		角闪石英英长岩		花岗岩长岩		钾化花岗岩长岩		花岗岩长岩		钾化花岗岩长岩		花岗岩长岩		硅化花岗岩长岩	
	ZK02-44	ZK02-49	ZK02-51	ZK09-1	ZK09-5	ZK09-8	60.1	67.2	78.5	114.7	ZK203-3	ZK203-5	ZK102-G18	07HT117	07HT118	07HT119		
Cs	6.82	0.79	1.75	3.10	4.76	1.82	0.68	1.55	2.30	1.96	4.18	2.68	2.88	2.00	1.60	1.58		
Rb	70.2	16.1	45.0	40.8	36.7	35.4	18.2	17.8	22.6	35.4	74.2	62.4	114.2	34.9	35.5	30.7		
Ba	430	354	630	689	537	636	322	332	310	302	380	462	314	1033	766	839		
Th	3.62	1.91	3.20	2.68	2.54	2.27	1.46	1.92	1.16	1.81	3.24	2.36	4.32	5.09	4.92	4.69		
U	1.03	0.49	0.68	0.87	0.94	0.97	0.43	0.53	0.34	0.58	1.04	0.85	1.26	1.34	1.25	1.39		
Nb	2.30	1.70	2.16	2.35	2.22	1.96	0.82	1.28	0.99	1.78	2.36	2.26	3.06	4.73	4.12	4.09		
Ta	0.24	0.17	0.19	0.19	0.18	0.18	0.07	0.16	0.19	0.18	0.31	0.17	0.31	0.34	0.30	0.32		
La	11.6	9.78	10.4	10.3	8.26	10.4	8.10	10.3	7.42	7.58	8.66	10.8	7.62	22.4	23.4	19.3		
Ce	25.4	22.6	24.2	22.6	22.3	21.9	17.5	23.4	17.2	18.1	20.6	24.2	22.4	39.3	37.4	35.0		
Pr	3.48	3.10	3.20	3.16	2.72	2.88	2.40	3.26	2.38	2.58	2.86	3.16	3.34	5.39	5.46	4.78		
Sr	197	762	456	864	545	589	652	666	566	692	756	588	438	399	479	363		
Nd	13.6	13.7	13.3	14.0	12.4	12.2	10.5	14.3	10.4	11.4	12.1	12.9	14.3	20.0	19.8	17.5		
Zr	152	61	130	102	105	87	42	57	41	60	117	104	138	127	116	116		
Hf	3.18	1.36	2.65	3.17	3.31	2.78	0.86	1.10	0.91	1.20	2.29	2.28	2.75	3.27	2.96	3.18		
Sm	2.62	2.60	2.76	2.91	2.65	2.43	2.24	3.02	2.34	2.52	2.88	2.64	3.50	3.30	3.04	2.88		
Eu	0.68	1.05	0.73	1.01	0.92	0.89	0.92	1.23	0.99	0.87	0.93	0.89	0.85	0.95	0.95	0.91		
Gd	2.28	2.60	2.56	2.94	2.71	2.44	2.00	2.98	2.18	2.46	2.36	2.52	2.98	2.70	2.43	2.30		
Tb	0.38	0.42	0.41	0.48	0.44	0.39	0.33	0.44	0.34	0.38	0.41	0.36	0.49	0.37	0.36	0.34		
Dy	2.54	2.40	2.60	2.63	2.46	2.13	1.94	2.70	2.18	2.38	2.58	2.36	3.14	2.16	2.01	1.90		
Y	13.9	12.2	15.3	14.3	13.0	11.5	10.2	14.5	10.7	11.3	12.9	13.2	15.8	13.6	12.4	11.9		
Ho	0.47	0.45	0.54	0.53	0.50	0.43	0.39	0.55	0.42	0.44	0.51	0.44	0.59	0.45	0.40	0.39		
Er	1.51	1.27	1.57	1.55	1.46	1.26	1.05	1.57	1.20	1.13	1.32	1.35	1.64	1.36	1.26	1.14		
Tm	0.22	0.19	0.24	0.25	0.23	0.20	0.16	0.23	0.17	0.19	0.21	0.20	0.26	0.23	0.22	0.20		
Yb	1.50	1.31	1.68	1.58	1.49	1.30	1.08	1.48	1.17	1.15	1.43	1.35	1.64	1.53	1.54	1.48		
Lu	0.27	0.20	0.26	0.25	0.24	0.21	0.19	0.24	0.20	0.19	0.24	0.24	0.27	0.26	0.24	0.24		
Cr	159	214	204	322	271	231	167	188	134	194	274	272	190	274	264	341		

续表 1  
Contn. Table 1

组分	V号岩体															
	卣号岩体				角闪石英闪长岩				花崗闪长岩							
	右英闪长岩				角闪石英闪长岩				花崗闪长岩							
	ZK02-44	ZK02-49	ZK02-51	ZK09-1	ZK09-5	ZK09-8	60.1	67.2	78.5	114.7	ZK203-3	ZK203-5	ZK102-G18	07HT117	07HT118	07HT119
Li	28.60	5.68	8.90	10.00	16.00	8.00	5.94	7.48	5.80	13.06	8.82	6.02	9.58	3.60	7.24	6.51
Be	0.94	1.22	1.46	0.84	0.89	0.83	1.96	2.24	1.59	2.18	1.35	1.50	2.04	1.05	1.25	1.11
Sc	8.38	13.14	8.66	12.84	9.81	11.32	13.98	18.60	16.16	9.94	12.80	13.82	10.02	0.82	0.68	0.46
V	83.2	194	81.00	118	107	108	208	266	254	165	128	138	99.0	9.67	7.38	7.63
Co	12.3	21.8	12.4	17.8	15.5	16.2	23.2	24.2	28.8	17.7	13.9	20.0	15.5	1.14	1.09	1.26
Ni	62.8	79.6	81.4	133.1	112.8	95.8	62.6	68.8	55.6	77.6	111	96.0	82.4	2.21	9.61	6.89
Cu	21.8	74.6	28.6	54.0	85.7	127	93	119	66	190	1888	1730	5100	106	158	184
Zn	51.8	72.4	96.4	15.3	3.84	37.0	126	144	206	121	85	84	143	106	137	93
Mo	1.08	1.35	1.59	1.61	2.66	1.69	1.42	1.42	1.28	1.56	6.66	2.40	88.80	0.41	0.47	0.99
Sb	5.22	0.57	0.47	-	-	-	1.02	0.77	1.09	1.54	1.92	0.78	2.34	2.47	1.32	3.31
Bi	0.22	0.46	0.20	-	-	-	0.55	0.51	0.49	2.32	0.23	0.35	3.00	0.04	0.05	0.08
Cd	0.05	0.11	0.08	0.08	0.12	0.10	0.08	0.16	0.06	0.09	0.10	0.19	0.79	0.02	0.11	0.08
In	0.04	0.06	0.04	-	-	-	0.07	0.10	0.10	0.05	0.07	0.10	0.20	0.02	0.02	0.02
W	6.04	0.41	0.49	0.62	1.09	0.72	1.20	0.42	0.33	2.56	3.06	4.84	3.32	0.44	0.45	0.62
Tl	0.27	0.16	0.22	0.14	0.12	0.12	0.17	0.15	0.26	0.28	0.29	0.32	0.39	0.33	0.26	0.23
δEu*	0.86	1.23	0.84	1.06	1.05	1.12	1.32	1.25	1.34	1.07	1.09	1.05	0.80	0.98	1.06	1.08
(La/Yb) <sup>*</sup>	5.57	5.34	4.45	4.67	3.97	5.75	5.36	5.00	4.55	4.71	4.34	5.72	3.32	10.49	10.87	9.39
REE	66.63	61.71	64.45	64.13	58.71	59.08	48.83	65.71	48.57	51.43	57.09	63.42	63.07	100.4	98.47	88.38

\* 单位为1。

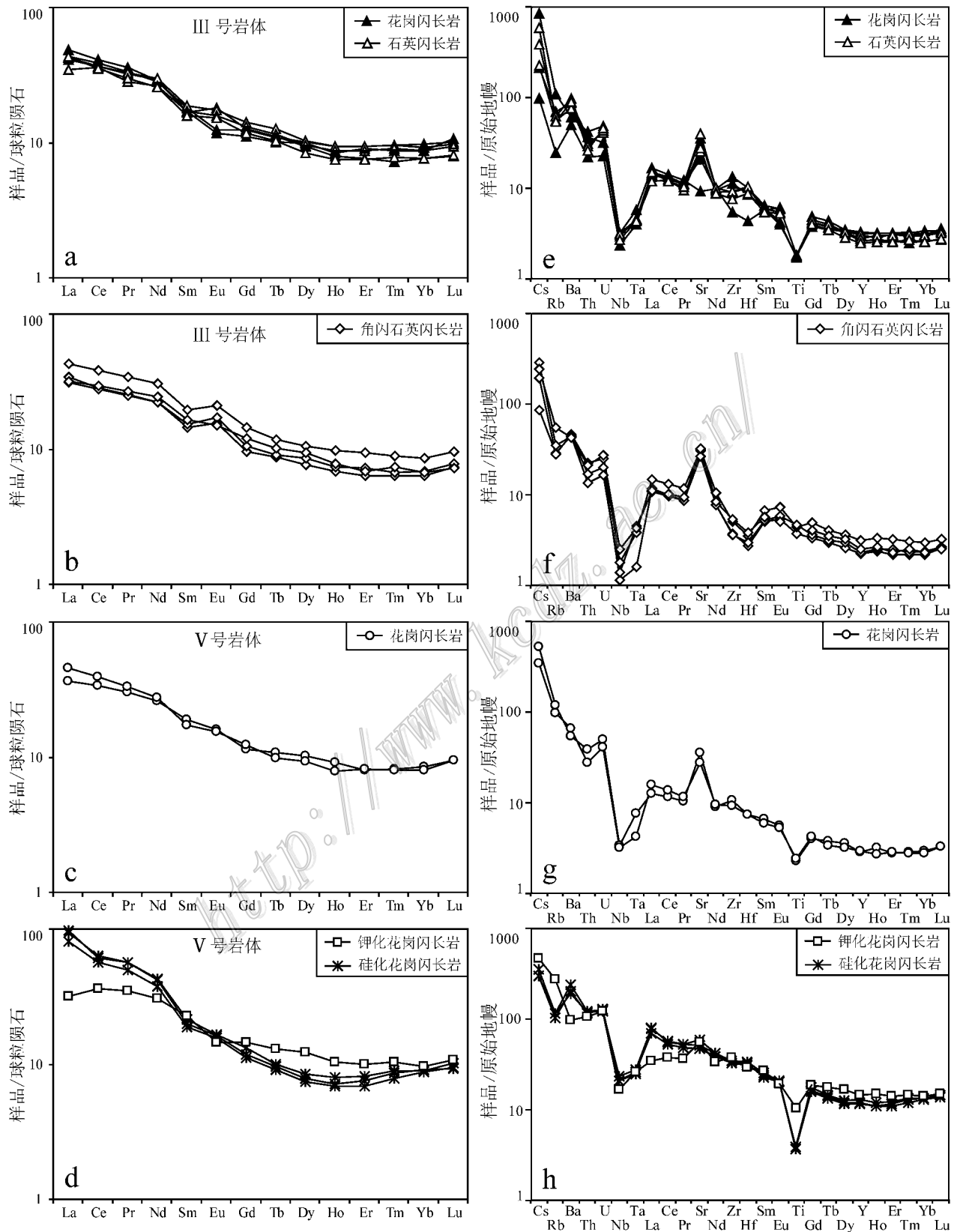


图 8 包古图 III 号和 V 号岩体稀土元素配分模式图 (a~d) 和微量元素蛛网图 (e~h) 标准化值据 Sun et al. , 1989)

Fig. 8 REE patterns (a~d) and spider diagrams (e~h) for Baogutu intrusion III and V (normalized values after Sun et al. , 1989)

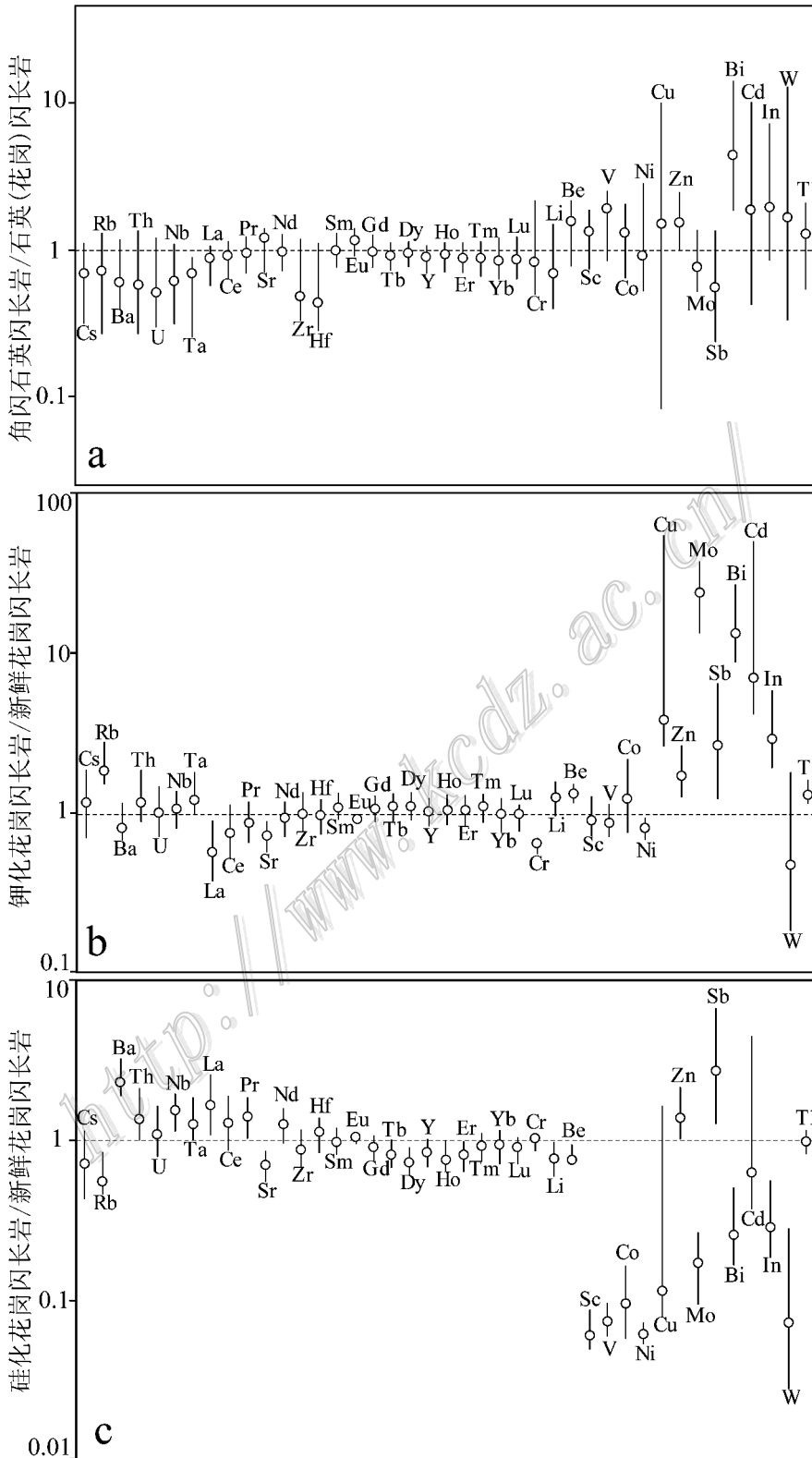


图9 岩浆-热液作用过程中元素变异图解

a. 岩浆作用晚期元素变异图解；b. 钾化过程元素变异图解；c. 硅化过程元素变异图解

Fig. 9 Elements variation diagram for the magmatic-hydrothermal process

a. Elements variation diagram for the late magmatic stage; b. Elements variation diagram for potassium alteration; c. Elements variation diagram for silicification

程中保持稳定。Cu、Zn、Mo、Sb、Bi 等成矿元素强烈富集于钾化样品,这就从元素迁移的角度证明了钾化过程对成矿作用的控制。

### 6.3 硅化过程中的元素迁移

包古图斑岩铜矿床岩浆-热液体系演化的晚期阶段发育硅化蚀变,原岩蚀变分解为细小的石英和黑云母颗粒,见少量斜长石残斑。比较未蚀变样品和硅化花岗闪长岩样品发现(图 9c),Cs 和 Rb 呈现出明显的亏损趋势,这 2 个元素在钾化过程中含量较高,而在流体作用晚期活动性较弱。Ba 元素的富集,指示大部分 Ba 在此阶段进入黑云母。从钾化到硅化过程中 Sr 元素一直呈亏损趋势,指示它的活动性极强,随流体分离出斑岩成矿体系。稀土元素中, LREE(La、Ce、Pr、Nd)呈微弱富集趋势, HREE(Sm、Eu、Gd、Tm、Yb、Lu)保持稳定,指示钾化阶段随流体迁移的 La 和 Ce 在硅化阶段沉淀下来。HREE 在整个岩浆-热液作用过程中的稳定性表明其可用于流体性质的反映和流体来源的示踪。Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素主要受榍石和锆石等矿物的控制,无统一变化趋势。未蚀变样品的 Sc、V、Co、Ni 含量明显高于硅化样品,这些元素主要赋存在角闪石中,硅化过程中原生角闪石蚀变分解为细小的石英和黑云母,导致样品中的 Sc、V、Co、Ni 丢失。硅化样品中 Cu、Mo、Bi 的含量较低,因为它们早期钾化过程中沉淀成矿;Zn 和 Sb 的含量明显升高,说明这 2 个元素在成矿流体中的活动性更强,在晚期阶段富集。

## 7 结 论

包古图斑岩铜矿区不同侵入体蚀变矿化特征差别明显,Ⅲ号岩体矿化中等,以浸染状黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿为主,少量硫化物脉。V 号岩体内部及其与围岩接触带产出大型铜矿床,金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿,其次为毒砂、磁黄铁矿、闪锌矿、辉铜矿、自然铜和蓝辉铜矿,呈浸染状和细脉-网脉状分布。成矿作用开始于岩浆-热液过渡阶段,Cs、Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素在挥发相中富集,稀土元素稳定未迁移,Cu、Bi 显著富集,Mo 和 Sb 被流体带走。在钾化阶段 Nb、Ta、Zr、Hf 稳定,轻稀土元素显著迁移,在硅化阶段轻稀土元素富集,重稀土元素在岩浆-热液演化过程保持稳定,可示踪流体来源。Sr 随流体分离出斑岩成矿体系。Zn 和 Sb 在晚期石英脉中富集。Cu、Mo 和 Bi 在钾化过程中

沉淀成矿。

志 谢 两位匿名审稿人提出的修改意见和建议帮助提高了本文质量,北京大学古丽冰老师指导完成实验测试,野外工作得到了武警黄金第八支队的支持和帮助,北京大学韩宝福、刘树文、刘玉琳老师,中国地质大学(北京)罗照华老师在成文过程中给予了诸多建议,谨在此一并感谢。

### 参考文献/References

- 安 芳,朱永峰. 2007. 新疆哈图金矿蚀变岩型矿体地质和地球化学研究[J]. 矿床地质, 26(6): 621-633.
- 安 芳,朱永峰. 2009. 新疆西准噶尔包古图组凝灰岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 25: 1437-1445.
- 成 勇,张 锐. 2006. 新疆西准包古图地区铜金矿成矿规律浅析[J]. 地质与勘探, 42: 11-15.
- 郭丽爽,刘玉琳,王政华,宋 达,许发军,苏 犁. 2010. 西准噶尔包古图地区地层火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究[J]. 岩石学报, 26: 471- 477.
- 韩宝福,李建清,宋 彪,陈立辉,张 磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 22(5): 1077-1086.
- 李辛子,韩宝福,李建清,李宗怀,刘志强,杨 斌. 2004. 新疆克拉玛依中基性岩墙群得地质地球化学和 K-Ar 年代学[J]. 地球化学, 33: 574-584.
- 罗照华,卢欣祥,陈必河 等. 2009. 透岩浆流体成矿作用导论[M]. 北京:地质出版社.
- 申 萍,沈远超,刘铁兵,张 锐,王京彬,张云孝,孟 磊,王丽娟,汪 疆. 2009. 新疆包古图斑岩型铜钼矿床容矿岩石及蚀变特征[J]. 岩石学报, 25(4): 777-792.
- 申 萍,深远超. 2010. 西准噶尔与环巴尔喀什斑岩型铜矿床成矿条件及成矿模式对比研究[J]. 岩石学报, 26(8): 2299-2316.
- 沈远超,金成伟. 1993. 西准噶尔地区岩浆活动与金矿化作用[M]. 北京:科学出版社. 113-171.
- 唐功建,王 强,赵振华, Wyman D A, 陈海红,贾小辉,姜子琦. 2009. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义[J]. 地球科学, 34(1): 56-74.
- 佟丽莉,李永军,张 兵,刘 静,庞振甲,王军年. 2009. 新疆西准噶尔达拉布特断裂带南包古图组安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质年代[J]. 新疆地质, 27(3): 226-230.
- 王 瑞,朱永峰. 2007. 西准噶尔宝贝金矿地质与容矿火山岩的锆石 SHRIMP 年龄[J]. 高校地质学报, 13(3): 590-602.
- 魏少妮,程军峰,喻达兵,郑 波,朱永峰. 2011. 新疆包古图Ⅲ号岩体岩石学和锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地学前缘, 18: 212-222.

- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 1-841.
- An F and Zhu Y F. 2010. Native antimony in the Baogutu gold deposit (west Junggar, NW China): Its occurrence and origin[J]. *Ore Geology Reviews*, 37: 214-223.
- Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370: 519-527.
- Liu Y L, Guo L S, Song H X, Song B, Zhang R, Xu F J and Zhang Y X. 2009. Geochronology of Baogutu porphyry copper deposit in Western Junggar area, Xinjiang of China[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 52(10): 1543-1549.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Econ. Geol.*, 98: 1515-1533.
- Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, Einaudi M T, Zurcher L, Stavast W J A, Johnson D A and Barton M D. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features[J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 29: 251-298.
- 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.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105: 3-41.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic study of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [M]. *Geological Society of London, Special Publication*. 42: 313-345.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, Li ZH X, Zhao ZH H, Jia X H and Jiang Z Q. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China)[J]. *Chemical Geology*, 277: 281-300.
- Tang G J, Wyman D A, Wang Q, Li J, Li ZH X, Zhao ZH H and Sun W D. 2012. Asthenosphere-lithosphere interaction triggered by a slab window during ridge subduction: Trace element and Sr-Nd-Hf-Os isotopic evidence from Late Carboniferous tholeiites in the western Junggar area (NW China)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 329-330: 84-96.
- Urqueta E, Kyser K T, Clark A H, Stanley C R and Oates C J. 2009. Lithogeochemistry of the Collahuasi porphyry Cu-Mo and epithermal Cu-Ag(-Au) cluster, northern Chile: Pearce element ratio vectors to ore[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, 9(1): 9-17.
- Williams-Jones A E and Heinrich C A. 2005. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits[J]. *Econ. Geol.*, 100: 1287-1312.
- Yin J Y, Yuan C H, Sun M, Long X P, Zhao G CH, Wong K P and Geng H Y, Cai K D. 2010. Late Carboniferous high-Mg dioritic dikes in Western Junggar, NW China: Geochemical features, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 17: 145-152.