

新疆赤湖-福兴铜矿区角闪石矿物化学 特征及其地质意义

龚林^{1,2}, 陈华勇^{1,3*}, 肖兵¹, 王云峰^{1,2}, 赵联党^{1,2}

(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. 广东省 矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 赤湖和福兴铜矿位于东天山大南湖-头苏泉岛弧带中。本文以矿区中酸性岩体中的角闪石为研究对象, 利用电子探针技术(EPMA)对岩体中的角闪石进行矿物学及矿物化学研究, 限定矿区岩体形成的构造背景和物理化学条件, 并探讨了岩浆演化和成矿作用过程。电子探针成分结果表明, 矿区角闪石主要为镁角闪石、钙镁闪石质角闪石和次生阳起石, 其成因主要为岩浆成因, 部分遭受次生改造, 形成过程中有幔源物质的参与, 且与俯冲作用相关。赤湖闪长玢岩中角闪石形成的压力为 244~451 MPa (2.44~4.51 kbar), 相当于 8~15 km 的深度, 温度为 880~918 °C, $\lg f_{O_2}$ 和熔体中的水含量分别为 -10.2 ~ -11.1 和 6.4%~7.0%; 赤湖花岗闪长岩、石英闪长岩和福兴石英闪长岩、闪长岩及其角闪石形成的压力为 30~90 MPa (0.3~0.9 kbar), 相当于 1~3 km 的深度, 温度为 640~785 °C, $\lg f_{O_2}$ 和熔体中的水含量分别为 -12.3 ~ -13.8 和 3.6%~4.8%。赤湖-福兴矿区岩体中的角闪石可能形成于两个不同深度的岩浆房, 幔源岩浆运移到深部岩浆房时形成闪长玢岩中的角闪石斑晶, 随后残余岩浆继续上升, 在浅部岩浆房形成闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩中的角闪石, 并伴随着流体的出溶和成矿元素的运移, 最后在浅部岩浆房顶部形成铜矿床。

关键词: 矿物成分; 角闪石; 结晶条件; 赤湖-福兴铜矿区; 新疆

中图分类号: P595; P574.2 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)02-0149-20

Mineral chemistry of hornblende in the Chihu-Fuxing copper district, Xinjiang, and its geological significance

GONG Lin^{1,2}, CHEN Hua-yong^{1,3*}, XIAO Bing¹, WANG Yun-feng^{1,2} and ZHAO Lian-dang^{1,2}

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou 510640, China

Abstract: The Chihu and Fuxing copper deposits are located in the Dananhu-Tousuquan island arc belt of Eastern Tianshan. This study focuses on the hornblende found in the intermediate-acidic igneous rocks. Using electron microprobe analyses (EPMA), we study the characteristics of hornblende and constrain the tectonic setting and physicochemical conditions related to the pluton formation. In addition, we discuss the process of magma evolution and its relationship with Cu mineralization. The EPMA data show that hornblende is composed mainly of magnesiohornblende, tschermakitic hornblende, and secondary actinolite. These components were primarily formed by magmatism and part of them were altered. The mantle materials were possibly involved in the formation of these plutons during subduction. The values of crystallization pressure, temperature, $\lg f_{O_2}$ and H_2O content of the hornblende in the melt of diorite porphyry (Chihu) are 244~451 MPa or 2.44~4.51 kbar, (equivalent to 8~15 km), 880~918 °C, -10.2 ~ -11.1, and 6.4%~7.0%, respectively. The corresponding values pertaining to the melt of granodiorite (Chihu), quartz diorite (Chihu and Fuxing), and diorite (Fuxing) and their hornblendes are

收稿日期(Received): 2017-02-28; 改回日期(Revised): 2017-07-08; 接受日期(Accepted): 2017-08-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB440802); 中国科学院“百人计划”项目(Y333081A07)

作者简介: 龚林(1993-), 男, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: cas.gonglin@foxmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Hua-yong, E-mail: huayongchen@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85292708

30~90 MPa or 0.3~0.9 kbar, (equivalent to 1~3 km), 640~785 °C, -12.3 ~ -13.8, and 3.6%~4.8%, respectively. Thereby, we conclude that the hornblendes might have formed in two different magma chambers at different depths. Mantle-derived magma might have migrated from depth into the deep magma chamber and formed the hornblende of the diorite porphyry; thereafter, the residual magma carrying the hornblendes ascended. this was accompanied by the exsolution of fluid from the magma and the migration of ore-forming elements. Granodiorite, quartz diorite, and diorite and their hornblendes might have formed in the shallow magma chamber and copper mineralization might have occurred at the top.

Key words: mineral chemistry; hornblende; crystallization conditions; Chihu-Fuxing copper district; Xinjiang

0 引言

赤湖和福兴铜矿位于大南湖-头苏泉岛弧带的土屋-延东铜矿带中,是土屋-延东斑岩铜矿带的重要组成部分。土屋-延东铜矿带自20世纪90年代发现以来,便进行了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果,特别是土屋和延东铜矿^[1-7],这些研究多集中于成岩成矿年代学、流体演化和岩石地球化学等,对于土屋-延东铜矿带岩体形成的物理化学条件的定量研究还很薄弱,这制约了成岩成矿作用过程及条件的精确刻画。矿物化学可以较好地限定成矿作用过程及其物化条件^[8-9],前人研究表明,角闪石的化学成分能够反映其分离结晶时的物理化学条件^[10-16]以及构造环境^[17-18]。角闪石结晶时岩浆房的温度和压力条件对于限定岩体的隆升历史^[19-22]、火山的喷发机制^[23-25]以及俯冲带岛弧岩浆演化^[26-27]具有重要的指示意义,且角闪石结晶时岩浆氧逸度的高低以及流体的出溶对成矿作用过程也有重要的影响^[11,28]。但由于土屋和延东铜矿区的岩体蚀变严重,很少发现新鲜的火成角闪石,这严重制约了利用角闪石矿物学及矿物化学特征所进行的相关研究。因此本文选取该矿带上岩体蚀变较弱的赤湖和福兴铜矿区的角闪石进行研究,以查明矿区岩体形成的物化条件,这对于理解整个土屋-延东铜矿带岩体形成的结晶特征、构造背景和成岩成矿过程,具有重要的启示作用;也对理解斑岩铜矿的形成条件具有重要意义。

赤湖铜矿位于哈密市以南约80 km,从1986年发现至今,目前已对矿区岩体开展了一些成岩成矿年代学以及岩石地球化学的研究工作^[29-31];福兴铜矿位于哈密市西南约132 km,是最近在东天山发现的一个斑岩型铜矿。目前对这两个矿床已经开展了成岩成矿年代学、岩石地球化学以及成矿流体等方面的研究^[32-33],这些研究对于理解赤湖和福兴铜矿

的矿床成因、岩浆演化以及成矿地球动力学背景具有重要的意义。本文在前人研究的基础上,通过对赤湖和福兴铜矿区岩体中的角闪石进行岩相学、矿物学及矿物化学研究,以约束矿区岩体形成的构造环境、结晶时的温压以及氧逸度条件,进而探讨矿区的岩石成因、岩浆演化特征、成矿潜力以及成矿作用过程。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

新疆赤湖和福兴铜矿位于中亚造山带南缘的东天山地区。东天山在构造上自北向南依次分为博格达-哈尔里克构造带、觉罗塔格构造带和中天山地块^[5]。博格达-哈尔里克由奥陶系-石炭系火山岩、花岗岩和镁铁质-超镁铁质杂岩组成,觉罗塔格构造带发育中古生代火山-沉积岩系,中天山地块由前寒武系结晶基底组成^[4-5]。

觉罗塔格构造带自北向南依次划分为大南湖-头苏泉岛弧带、康古尔-黄山韧性剪切带和雅满苏岛弧带(或弧后盆地)(图1a)。大南湖-头苏泉岛弧带位于康古尔断裂以北,是东天山重要的铜矿带,从西往东分布有小热泉子、福兴、延东、土屋、灵龙、赤湖、玉海和三岔口等铜矿床;康古尔韧性剪切带位于康古尔断裂和雅满苏断裂之间,带内岩石韧性变形强烈,该带西段主要分布金矿床,如石英滩、康古尔和西凤山等金矿床,东段主要分布岩浆铜镍硫化物矿床,如土墩、黄山铜镍硫化物矿床;雅满苏岛弧带位于雅满苏断裂和阿奇克库都克断裂之间,分布着一系列铁、铜(金)和银多金属矿床以及自然铜矿床,如雅满苏铁铜矿、维权银多金属矿床和十里坡自然铜矿床等^[4,5,34]。

赤湖和福兴铜矿位于大南湖-头苏泉岛弧带中,该带地层主要由泥盆系大南湖组火山岩和碎屑沉积

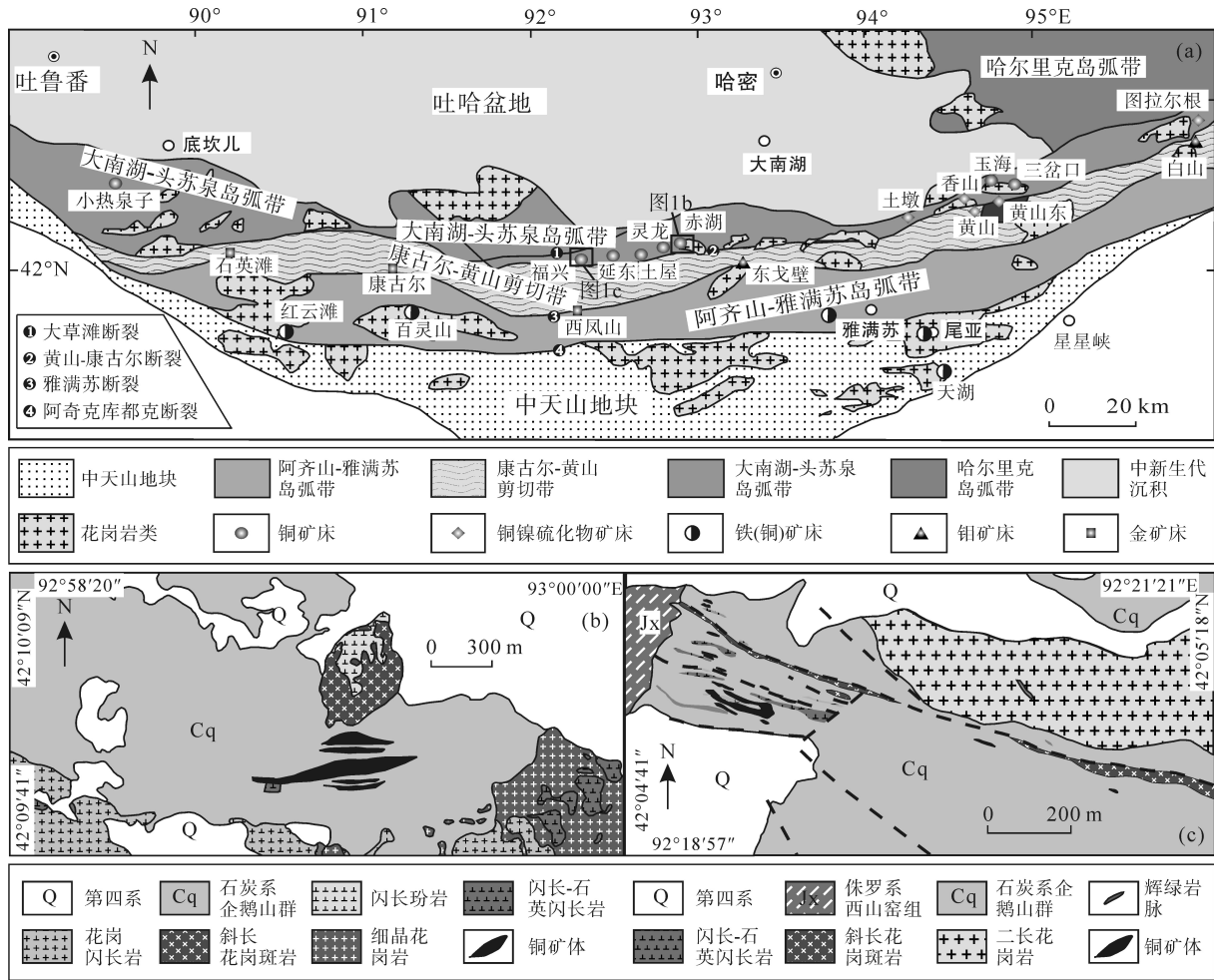


图 1 东天山地区构造单元划分图(a, 据王京彬等^[34]; Mao *et al.*^[35]修改); 赤湖铜矿床地质图(b, 据新疆地质调查院^[36]); 福兴铜矿床地质图(c, 据 Wang *et al.*^[33])

Fig.1 Sketch map showing the tectonic units of Eastern Tianshan, after Wang *et al.*^[34]; Mao *et al.*^[35] (a); simplified geological map of the Chihu copper deposit, after Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration^[36] (b); simplified geological map of the Fuxing copper deposit, after Wang *et al.*^[33] (c)

岩、石炭系干墩组浊积岩、石炭系企鹅山群玄武-安山质火山岩和沉积岩、二叠系钙碱性火山-火山碎屑-碎屑岩、侏罗系砂岩和新生代覆盖层组成^[33]。该带发育一个由企鹅山群地层组成的近东西向展布的大型复式褶皱; 带内主要的大断裂为康古尔断裂和大草滩断裂, 两个断裂总体走向近东西, 倾向南, 两侧次级断裂发育, 主要为走向北东东、倾向北西北的压扭性断裂^[4,5,37]。该带岩浆作用强烈, 岩石类型多样, 主要为华力西期的斜长花岗岩-花岗闪长岩-二长花岗岩系列和斜长花岗斑岩、闪长玢岩等^[37]。

1.2 矿床地质

赤湖铜矿区出露的地层主要为下石炭统企鹅山群玄武岩、安山岩和角砾安山岩, 夹凝灰岩和岩屑砂岩^[29,38]。侵入岩呈岩株状产出, 岩性主要有细晶花岗岩、花岗闪长斑岩((314.5±2.5) Ma)、花岗闪长

岩((320.2±2.4) Ma)、闪长玢岩、石英闪长岩和斜长花岗斑岩((322±10) Ma)^[29-30]。闪长玢岩产于矿区中部, 被斜长花岗斑岩侵入(图 1b), 地表矿体产于闪长玢岩与斜长花岗斑岩的内外接触带中^[30], 而其他花岗岩类位于矿区南部(图 1b)。矿区构造为一向南倾的单斜, 近东西向断裂和破碎带发育^[38]。

矿体主要由 3 个独立矿体组成, 长 400~800 m, 厚 9~58 m, 呈脉状、透镜状和似层状产出(图 1b), 铜矿石品位一般为 0.2%~0.3%, 钼矿石品位一般为 0.02%~0.04%。矿石具细脉状、浸染状和细脉浸染状构造, 结构有鳞片变晶结构、微粒状变晶结构和变余结构。矿石矿物有黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿、辉铜矿和黄铁矿等, 脉石矿物为石英、绢云母、高岭石、斜长石和绿泥石等。近矿围岩蚀变主要为硅化、绢云母化、高岭石化、黑云母化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化等^[30,38]。

福兴铜矿区出露的地层主要为石炭系企鹅山群地层,岩性为安山岩和玄武岩,夹凝灰岩;安山质-玄武质角砾岩,含玄武岩夹层的砂岩、粉砂岩以及底砾岩。矿区还出露不整合于企鹅山群地层之上的侏罗系西山窑组,岩性主要为砂岩、粉砂岩和砾岩。矿区出露的岩体呈岩株、岩脉状产出,岩性有石英闪长岩、斜长花岗斑岩((332.1±2.2) Ma)和二长花岗岩((328.4±3.4) Ma)等,斜长花岗斑岩和二长花岗岩与矿化有关。矿区次级断裂发育,分为北西-南东向、北东-南西向和东西向组合(图 1c)^[32-33]。

福兴铜矿床在地表呈狭长的东西向展布,主矿体长 555~2315 m,厚 2~107 m,向南陡倾,延深超过 600 m。矿化主要呈浸染状和细脉状,矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿,少量辉钼矿、斑铜矿、闪锌矿和辉铜矿;脉石矿物主要有石英、绢云母和绿泥石,少量黑云母、绿帘石和方解石。围岩蚀变有钾化、绿泥石-绢云母化和绢英岩化蚀变。矿化可以分为 4 个阶段:第一阶段为与钾化蚀变有关的脉状和浸染状矿化,矿物组合为石英、黄铁矿;第二阶段为与绿泥石-绢云母-绢英岩化蚀变有关的脉状矿化,矿物组合为石英、黄铁矿和黄铜矿;第三阶段为围岩中的脉状和浸染状矿化,矿物组合为石英、黄铁矿和辉钼矿;第四阶段为碳酸盐岩和少量的硫化物^[32-33]。

2 样品描述和分析方法

本文选取了赤湖和福兴铜矿区的中酸性岩体进行研究,均为地表取样。由于岩体中的角闪石需要尽量满足蚀变较弱的要求,因此采自赤湖铜矿区的岩石类型为闪长玢岩、花岗闪长岩和石英闪长岩,其中闪长玢岩被斜长花岗斑岩侵入,两者呈岩株状分布于矿区中部,在斜长花岗斑岩的内外接触带上赋存矿体^[30];花岗闪长岩和石英闪长岩大面积分布于矿区南部。已有的年代学数据表明矿化稍晚于花岗闪长岩和石英闪长岩的形成,且与土屋-延东铜矿的成矿时代接近^[29,38]。由于地表风化严重,很难准确判断花岗岩体的侵入次序,结合野外穿切关系及已有的部分年代学数据,闪长玢岩应最早形成,而后为斜长花岗斑岩和花岗闪长岩,石英闪长岩和细晶花岗岩也可能在此时形成。采自福兴铜矿区的岩性有闪长岩和石英闪长岩,空间上与成矿密切相关,呈岩脉状产出,空间展布与斜长花岗斑岩相近(图 1c),局部含有少量矿石。详细的岩性特征如下。

闪长玢岩 岩石为灰-暗绿色,斑状结构,斑晶为角闪石和斜长石(图 2a),斑晶含量约 40%~50%,角闪石为绿-黄绿色,多色性明显,解理发育,多呈菱形和长柱状自形晶,环带和双晶发育(图 2f),粒径 0.5~1.5 mm,含量约 15%。斜长石无色,晶体呈板状,环带结构和卡-钠联合双晶发育,粒径 1~2 mm,含量约 20%,晶内局部包裹角闪石晶体(图 2f)。基质主要为长石和角闪石,副矿物为铁钛氧化物。

花岗闪长岩 浅灰色微带肉红色,中粒粒状结构(图 2b),块状构造,主要矿物组成为斜长石、钾长石、角闪石和石英(图 2g)。斜长石呈半自形板状,聚片双晶发育,可见不明显的环带构造,粒径 1.5~3.0 mm,含量 45%~60%,部分发生绢云母化。角闪石呈浅黄绿色,解理发育,呈半自形板柱状产出,有时包裹磷灰石和磁铁矿颗粒,粒径 1.5~2.5 mm,含量约 20%。石英呈他形粒状,波状消光,粒径多小于 1 mm,约占 20%。钾长石呈他形粒状,具条纹结构(图 2g),粒径 1 mm 左右,含量约 5%。副矿物主要为磷灰石、磁铁矿和锆石等。

石英闪长岩 暗灰色,中粒结构(图 2c、d),块状构造,主要组成矿物为斜长石、角闪石和石英(图 2h、i、j)。斜长石呈半自形板状,聚片双晶发育,粒径 1.5 mm 左右,含量约 50%,多发生黏土化和绢云母化(图 2h、j)。角闪石有 2 种:一种呈菱形自形晶产出,解理发育;另一种为长柱状,发育简单双晶(图 2i、j),粒径 1~2 mm,含量约 30%,部分角闪石发生绿泥石化和绿帘石化(图 2h)。石英呈他形粒状,粒径小于 1 mm,含量约 15%。副矿物有磷灰石、锆石和磁铁矿等。赤湖矿区和福兴矿区的石英闪长岩的矿物学特征基本相同,只是福兴矿区岩体的蚀变稍强于赤湖矿区的岩体。

闪长岩 灰黑色,中细粒结构,组成矿物以角闪石和斜长石为主(图 2e)。斜长石为板状,粒径约 0.5~1.5 mm,含量约 60%,长石发生强烈的绢云母化(图 2k)。角闪石呈长柱状和菱形晶产出,粒径 0.5~2.0 mm,含量约 30%,部分发生绿帘石化和绿泥石化(图 2k)。石英呈他形粒状,含量较少,约占 5%。

考虑到运用角闪石化学成分计算物理化学条件时所需要的矿物共生组合和成分限制,本文利用电子探针显微分析技术,对赤湖和福兴铜矿区岩体中的角闪石以及共生斜长石进行矿物化学成分分析。分析测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素国家重点实验室和矿物学与成矿学重点实验

室完成,使用的仪器型号分别为 JEOL JXA-8230 和 JEOL JXA-8100。两种仪器的分析条件相同: 加速电压 15 kV, 电流 20 nA, 束斑直径 1 μm , 测试完成

后对所有数据进行 ZAF 处理, 使用美国 SPI 公司的硅酸盐矿物及氧化物标样进行标定, 分析误差优于 0.01%。

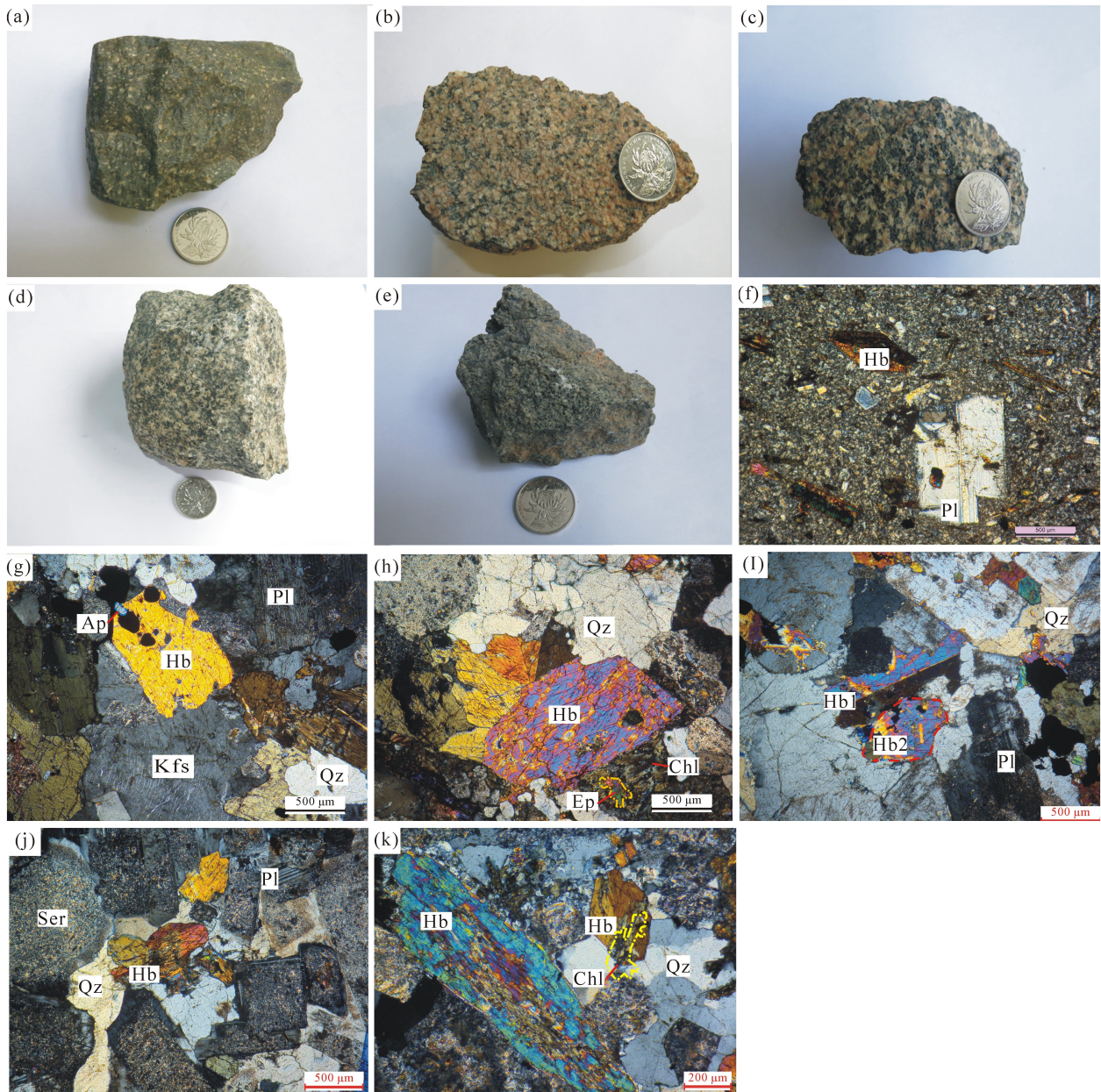


图 2 赤湖和福兴铜矿区的岩石学和矿物学特征

Fig.2 Photographs showing the characteristics of petrology and mineralogy from the Chihu and Fuxing copper deposit districts

(a) 赤湖铜矿区闪长玢岩岩石照片; (b) 赤湖铜矿区花岗闪长岩岩石照片; (c) 赤湖铜矿区石英闪长岩岩石照片; (d) 福兴铜矿区石英闪长岩岩石照片; (e) 福兴铜矿区闪长岩岩石照片; (f) 赤湖铜矿区闪长玢岩镜下显微照片(+); (g) 赤湖铜矿区花岗闪长岩镜下显微照片(+); (h) 赤湖铜矿区石英闪长岩镜下显微照片(+); (i) 赤湖铜矿区石英闪长岩中两种不同类型角闪石的显微照片(+); (j) 福兴铜矿区石英闪长岩镜下显微照片(+); (k) 福兴铜矿区闪长岩镜下显微照片(+).

Hb-角闪石; Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Qz-石英; Chl-绿泥石; Ep-绿帘石; Ser-绢云母; Ap-磷灰石; +-正交偏光。

(a) Hand specimen photograph of diorite porphyry from Chihu copper district; (b) hand specimen photograph of granodiorite from Chihu copper district; (c) hand specimen photograph of quartz diorite from Chihu copper district; (d) hand specimen photograph of quartz diorite from Fuxing copper district; (e) hand specimen photograph of diorite from Fuxing copper district; (f) photomicrograph of diorite porphyry from Chihu copper district (+); (g) photomicrograph of granodiorite from Chihu copper district (+); (h) photomicrograph of quartz diorite from Chihu copper district (+); (i) photomicrograph of two type of hornblendes in quartz diorite from Chihu copper district (+); (j) photomicrograph of quartz diorite from Fuxing copper district (+); (k) photomicrograph of diorite from Fuxing copper district (+).

Hb - hornblende; Pl - plagioclase; Kfs - K-feldspar; Qz - quartz; Chl - chlorite; Ep - epidote; Ser - sericite; Ap - apatite; +- perpendicular polarized light.

3 矿物成分特征

角闪石是赤湖和福兴铜矿区岩体中的主要造岩矿物之一,呈自形-半自形状产出,部分发育环带和双晶,局部岩体中的角闪石还发生次生蚀变。根据角闪石的电子探针成分分析结果(表1),矿区角闪石成分变化较大,其中闪长玢岩中的角闪石成分与其

他岩性相差较大。除赤湖铜矿区的闪长玢岩外,矿区岩体中的角闪石总体具有高的SiO₂含量(47.84%~51.91%)、高钙镁(CaO: 10.48%~12.24%; MgO: 13.23%~15.92%)和钠较低(Na₂O: 0.53%~1.37%)的特征,较高的FeO (12.30%~16.96%)和Al₂O₃ (2.38%~6.37%)含量,贫钾(K₂O: 0.19%~0.58%)和低TiO₂ (0.32%~1.24%)的特点,其中赤湖铜矿区石英闪长岩中出现两个异常点(CH48-2和CH48-3)。闪长玢岩中除异常

表1 矿区角闪石的电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses (%) of hornblende from the Chihu and Fuxing copper district

点号	CH46-1-1	CH46-1-3	CH46-1-4	CH46-1-5	CH46-1-6	CH46-5-1	CH46-5-2	CH46-5-3	CH46-5-4	CH48-2
岩性	花岗闪长岩(赤湖)					石英闪长岩(赤湖)				
SiO ₂	49.57	49.55	49.88	47.84	47.92	50.31	49.34	50.61	48.00	46.71
TiO ₂	1.06	1.10	1.00	0.99	1.02	0.71	1.18	0.84	1.20	0.43
Al ₂ O ₃	4.92	4.66	4.92	4.97	5.39	4.75	5.27	4.44	5.40	8.98
FeO	15.46	14.80	15.64	14.33	14.41	15.10	15.35	14.97	14.33	15.93
MnO	0.54	0.46	0.56	0.51	0.54	0.41	0.45	0.43	0.44	0.71
MgO	13.94	13.76	14.01	13.87	13.87	13.98	13.60	14.28	13.94	12.39
CaO	11.65	12.02	11.37	11.61	11.49	11.93	12.05	12.24	11.72	11.36
Na ₂ O	0.89	0.86	1.01	1.01	1.37	0.61	0.81	0.60	1.08	1.15
K ₂ O	0.52	0.47	0.47	0.47	0.58	0.42	0.53	0.40	0.55	0.28
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.13	0.12	0.13	0.15	0.14	0.13	0.12	0.08	0.16	0.01
total	98.67	97.81	98.98	95.74	96.89	98.35	98.70	98.89	96.81	97.93
Si(T)	7.133	7.133	7.133	7.133	7.133	7.246	7.132	7.258	7.059	6.747
Al ^{IV} (T)	0.835	0.775	0.829	0.869	0.935	0.754	0.868	0.742	0.936	1.253
Ti(T)	0.032	0.000	0.035	0.028	0.009	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000
Al ^{VI} (C)	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000	0.051	0.030	0.008	0.000	0.275
Ti(C)	0.083	0.121	0.073	0.082	0.103	0.077	0.128	0.091	0.128	0.047
Fe ³⁺ (C)	0.735	0.422	0.831	0.627	0.594	0.621	0.525	0.550	0.577	0.997
Mg(C)	2.991	2.992	2.988	3.070	3.045	3.003	2.931	3.053	3.056	2.667
Fe ²⁺ (C)	1.126	1.383	1.040	1.153	1.181	1.198	1.331	1.245	1.185	0.927
Mn(C)	0.065	0.057	0.068	0.064	0.068	0.050	0.055	0.052	0.054	0.087
Fe ²⁺ (B)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca(B)	1.796	1.878	1.744	1.847	1.813	1.840	1.866	1.881	1.846	1.758
Na(B)	0.204	0.122	0.256	0.153	0.187	0.160	0.134	0.119	0.154	0.242
Na(A)	0.043	0.119	0.024	0.136	0.203	0.010	0.092	0.048	0.154	0.079
K(A)	0.095	0.088	0.085	0.089	0.109	0.077	0.097	0.073	0.103	0.051
Al ^I	0.835	0.801	0.829	0.869	0.935	0.805	0.897	0.750	0.936	1.528
t ₁ (°C)	496	459	489	500	526				519	590
t _{2A} (°C)		319		405	440				419	468
t _{2B} (°C)	439	422	433	471	497				471	459
t ₃ (°C)	753	741	748	767	772	729	753	730	771	818
t ₄ (°C)	715	676	733	725	771	645	683	643	728	800
p ₃ (MPa)	0.64	0.61	0.63	0.67	0.74	0.61	0.70	0.56	0.74	1.73
p ₄ (MPa)	0.52	0.38	0.61	0.56	0.89	0.32	0.41	0.28	0.59	1.59
lgf _{O₂}	-13.3	-13.8	-13.3	-12.9	-13.0	-13.8	-13.5	-13.8	-13.0	-12.3
H ₂ O _{melt} (%)	4.3	4.3	4.4	4.2	3.8	4.8	4.5	4.5	4.0	7.8

(续表 1)

点号	CH48-3	CH48-4	CH48-5	CH41-1	CH41-2	CH42-1	CH42-2	CH42-3	CH42-4	CH42-5
岩性	石英闪长岩(赤湖)			闪长玢岩(赤湖)						
SiO ₂	45.32	50.36	49.60	51.14	44.61	45.67	44.59	45.27	44.80	43.14
TiO ₂	1.54	0.83	0.76	0.05	1.46	1.60	1.71	1.65	1.62	1.08
Al ₂ O ₃	11.10	4.47	4.29	1.91	11.23	10.53	11.46	10.85	11.34	11.12
FeO	10.55	12.30	14.18	21.26	12.24	12.84	12.35	11.93	14.01	14.83
MnO	0.12	0.43	0.34	0.63	0.10	0.23	0.18	0.17	0.23	0.28
MgO	15.39	15.92	15.22	10.35	14.87	14.09	14.43	14.86	13.58	12.46
CaO	10.95	11.81	12.01	12.40	10.85	10.81	11.16	10.83	10.63	10.77
Na ₂ O	2.33	0.95	0.58	0.11	1.95	2.13	2.22	2.32	2.27	2.16
K ₂ O	0.26	0.38	0.44	0.14	0.32	0.27	0.32	0.27	0.29	0.61
F	0.22	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.08
Cl	0.02	0.21	0.20	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
total	97.79	97.87	97.61	97.99	97.63	98.19	98.49	98.15	98.80	96.54
Si(T)	6.439	7.222	7.228	7.636	6.343	6.506	6.343	6.427	6.362	6.353
Al ^{IV} (T)	1.561	0.755	0.737	0.336	1.657	1.494	1.657	1.573	1.638	1.647
Ti(T)	0.000	0.023	0.035	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al ^{VI} (C)	0.299	0.000	0.000	0.000	0.225	0.274	0.265	0.243	0.261	0.282
Ti(C)	0.164	0.066	0.048	0.000	0.156	0.171	0.183	0.176	0.173	0.119
Fe ³⁺ (C)	0.902	0.655	0.831	0.381	1.221	0.937	0.952	0.997	1.117	0.997
Mg(C)	3.260	3.404	3.307	2.304	3.153	2.993	3.061	3.145	2.875	2.736
Fe ²⁺ (C)	0.351	0.820	0.772	2.235	0.235	0.593	0.518	0.419	0.546	0.829
Mn(C)	0.015	0.053	0.042	0.080	0.012	0.027	0.021	0.020	0.027	0.035
Fe ²⁺ (B)	0.000	0.000	0.125	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca(B)	1.667	1.815	1.875	1.983	1.653	1.650	1.701	1.647	1.618	1.699
Na(B)	0.333	0.185	0.000	-0.022	0.347	0.350	0.299	0.353	0.382	0.301
Na(A)	0.309	0.080	0.163	0.054	0.189	0.238	0.314	0.286	0.244	0.314
K(A)	0.047	0.070	0.082	0.026	0.058	0.048	0.058	0.048	0.052	0.115
Al ^I	1.859	0.755	0.737	0.336	1.882	1.768	1.922	1.816	1.898	1.929
t ₁ (°C)		373	441							
t _{2A} (°C)										
t _{2B} (°C)		484	465							
t ₃ (°C)	907	752	780	643	906	880	917	898	897	902
t ₄ (°C)	913	715	658	489	885	887	909	915	913	894
p ₁ (MPa)	580	60	50		590	540	610	560	600	620
p ₂ (MPa)						0.54			0.34	0.25
p ₃ (MPa)	2.78	0.57	0.55	0.31	2.88	2.44	3.05	2.62	2.94	3.08
p ₄ (MPa)	3.87	0.48	0.30	0.09	3.10	3.07	3.70	3.78	4.11	4.51
ΔNNO	1.5	2.2	2.1	0.9	1.5	1.2	1.2	1.4	1.0	0.9
lgf _{O₂}	-10.3	-12.8	-12.3	-16.9	-10.2	-11.1	-10.4	-10.5	-10.9	-10.9
H ₂ O _{melt} (%)	6.5	3.8	4.0	5.8	6.7	6.8	6.8	6.4	7.0	6.6

(续表 1)

点号	CH42-7	CH42-8	FX5-2	FX5-3	FX5-5	FX5-6	FX5-7	FX12-1	FX12-2	FX12-3	FX12-4
岩性	闪长玢岩(赤湖)		石英闪长岩(福兴)				闪长岩(福兴)				
SiO ₂	45.07	43.57	50.71	51.72	50.56	51.70	51.91	49.28	49.44	49.26	48.64
TiO ₂	1.71	1.73	0.64	0.67	0.69	0.37	0.36	0.89	0.84	0.80	0.93
Al ₂ O ₃	11.03	11.06	3.87	3.49	3.87	2.49	2.62	6.19	6.09	6.05	6.37
FeO	12.42	14.27	16.96	16.33	16.58	16.33	16.13	13.93	14.02	14.32	14.13
MnO	0.15	0.19	0.54	0.52	0.50	0.48	0.43	0.43	0.48	0.44	0.40
MgO	14.48	13.30	14.26	14.28	13.83	14.72	14.50	13.98	14.51	14.47	14.78
CaO	10.84	10.30	10.54	10.84	10.48	10.80	10.83	11.75	11.90	11.61	11.67
Na ₂ O	1.98	2.22	0.96	0.83	0.87	0.53	0.56	1.05	1.15	1.12	1.20
K ₂ O	0.28	0.30	0.26	0.23	0.20	0.19	0.25	0.35	0.34	0.29	0.33
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.04	0.03	0.07	0.03	0.07	0.05	0.06	0.02	0.04	0.02	0.04
total	97.98	96.97	98.80	98.94	97.66	97.64	97.88	97.87	98.81	98.36	98.48
Si(T)	6.406	6.304	7.389	7.508	7.452	7.567	7.608	7.110	7.062	7.044	6.946
Al ^{IV} (T)	1.594	1.696	0.611	0.492	0.548	0.430	0.392	0.890	0.938	0.956	1.054
Ti(T)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al ^{VI} (C)	0.255	0.190	0.054	0.105	0.125	0.000	0.061	0.163	0.088	0.064	0.018
Ti(C)	0.183	0.188	0.070	0.073	0.076	0.037	0.040	0.096	0.090	0.086	0.100
Fe ³⁺ (C)	1.076	1.255	1.316	1.052	1.175	1.228	1.081	0.541	0.649	0.799	0.873
Mg(C)	3.068	2.868	3.098	3.091	3.038	3.212	3.169	3.007	3.090	3.085	3.147
Fe ²⁺ (C)	0.400	0.471	0.396	0.616	0.523	0.463	0.596	1.140	1.025	0.914	0.814
Mn(C)	0.018	0.023	0.067	0.063	0.063	0.060	0.053	0.053	0.057	0.053	0.048
Fe ²⁺ (B)	0.000	0.000	0.355	0.315	0.345	0.307	0.299	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca(B)	1.650	1.596	1.645	1.685	1.655	1.693	1.701	1.817	1.821	1.779	1.786
Na(B)	0.350	0.404	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.183	0.179	0.221	0.214
Na(A)	0.196	0.218	0.272	0.234	0.248	0.149	0.158	0.111	0.139	0.088	0.118
K(A)	0.050	0.056	0.049	0.042	0.038	0.035	0.046	0.065	0.061	0.054	0.060
Al ^T	1.849	1.886	0.665	0.597	0.673	0.430	0.453	1.053	1.026	1.019	1.072
t ₁ (°C)			450		362						
t _{2A} (°C)				338		526					
t _{2B} (°C)			600		406						
t ₃ (°C)	896	899	775	752	766	730	726	767	773	768	785
t ₄ (°C)	885	918	727	689	702	651	636	714	736	734	752
p ₁ (MPa)	580							200	190	180	210
p ₂ (MPa)	0.19	0.22						0.87	0.65	0.72	0.59
p ₃ (MPa)	2.74	2.89	0.50	0.45	0.51	0.36	0.37	0.87	0.84	0.83	0.90
p ₄ (MPa)	2.93	4.08	0.56	0.40	0.47	0.27	0.27	0.60	0.68	0.67	0.76
ΔNNO	1.3	1.1	1.7	1.7	1.6	2.1	1.9	1.5	1.6	1.7	1.8
lgf _{O₂}	-10.6	-10.8	-12.7	-13.3	-13.0	-13.4	-13.6	-13.1	-12.8	-12.9	-12.4
H ₂ O _{melt} (%)	6.9	6.7	4.2	4.4	4.7	4.0	4.1	5.5	5.1	5.1	4.8

注: t₁ 据 Blundy *et al.*^[39]; t₂ 据 Holland *et al.*^[40]; t₃ 据 Ridolfi *et al.*^[15]; t₄ 据 Ridolfi *et al.*^[41]; p₁ 据 Schmidt^[42]; p₂ 据 Anderson *et al.*^[43]; p₃ 据 Ridolfi *et al.*^[15]; p₄ 据 Ridolfi *et al.*^[41]。Al^T 为全铝含量; 括号中的 A、B、C、T 代表角闪石结构式中的 A 位、B 位、C 位和 T 位; 括号外的 A 和 B 分别代表含石英和无石英的温度计。空白表示因为不满足温压计计算要求而未获得温压结果。

点(CH41-1)外,角闪石的SiO₂ (43.1%~45.7%)和K₂O (0.27%~0.61%)含量较低, TiO₂ 含量(1.08%~1.73%)较高,具有富钙镁(CaO: 10.3%~11.2%; MgO: 12.5%~14.9%)和富铝(10.5%~11.5%)的特点。根据国际矿物学协会角闪石专业委员会所推荐的命名原则^[44], 矿区角闪石均为钙质角闪石, 其中赤湖矿区花岗闪长岩、石英闪长岩和福兴闪长岩中的角闪石都为镁角闪石, 闪长玢岩中的角闪石为钙镁闪石质角闪石, 福兴矿区石英闪长岩中的角闪石为阳起石质角闪石和阳起石, 赤湖石英闪长岩中的 CH48-3 落入钙镁闪石质角闪石范围, 闪长玢岩中的 CH41-1 为阳起石(图 3a)。

斜长石在矿区岩体中广泛发育, 但是多发生次生蚀变。尽管在岩相学上选取了未蚀变的边部, 而且福兴闪长岩中的斜长石蚀变太强, 未进行分析, 但是根据与角闪石共生的斜长石以及闪长玢岩中环带斜长石的电子探针结果(表 2)发现, 由于蚀变作用的影响, 斜长石的成分变化大, An 组分含量为 4.7%~49.0%, Ab 组分含量为 50.3%~92.0%, Or 组分含量为 0.6%~15.0%, 主要类型有钠长石、歪长石、奥长石和正长石(图 3b)。

4 讨 论

4.1 角闪石的成因、来源及构造意义

角闪石可以形成于各种地质作用过程, 比如热液、岩浆和变质作用, 其成因类型的确定有助于解释成岩成矿过程和相关矿物温压计的计算结果。而角闪石的化学成分能够反映其成因, 在角闪石的

Mg/(Fe³⁺ + Fe²⁺ + ^{IV}Al)-Al/Si 图解(图 4a)^[46]中, 闪长玢岩中的一个点(CH41-1)落入变质区域内, 其余闪长玢岩、花岗闪长岩和福兴闪长岩中的角闪石为岩浆成因, 赤湖石英闪长岩和福兴石英闪长岩中的角闪石可能部分受到次生蚀变的影响。次生角闪石的 Ti 含量很低, 因此可以通过 Si 和 Ti 含量建立角闪石的成因类型判别图解^[49], 在角闪石的 Ti-Si 变异图解中(图 4b 和 4c)^[47-48], 闪长玢岩中的角闪石除蚀变和交代成因外(CH41-1), 全为深源捕虏的岩浆成因; 赤湖石英闪长岩中的角闪石大多为岩浆成因, 但样品 CH48-2 的角闪石为蚀变和交代成因, 以及样品 CH48-3 的角闪石为深源捕虏; 赤湖花岗闪长岩和福兴闪长岩中的角闪石全部为岩浆成因; 福兴石英闪长岩中的角闪石均遭受次生蚀变的影响。

角闪石的 TiO₂-Al₂O₃ 图解可以判别角闪石结晶的岩浆源区物质组成^[50], 矿区角闪石矿物成分投图(图 5c)表明, 闪长玢岩中的原生角闪石落入幔源岩浆相关的区域, 赤湖石英闪长岩中的 CH48-3 也来自地幔, 福兴石英闪长岩中的角闪石多数为壳源(但这也可能是受蚀变影响导致的), 其余岩性中的角闪石为壳幔混合来源。因此角闪石的矿物成分表明, 这些岩体的形成可能是幔源岩浆演化和地壳物质(俯冲洋壳熔融或者地壳混染)共同作用的产物, 这与该区岩体的 Sr、Nd、Hf 和 O 同位素数据一致^[29, 32, 33], 即俯冲板片的部分熔融, 然后与地幔楔相互反应; 其中闪长玢岩可能只与幔源岩浆演化有关, 地壳物质的贡献很少, 即地幔楔的部分熔融, 然后发生分异形成, 与延东闪长玢岩的来源相似^[5]。

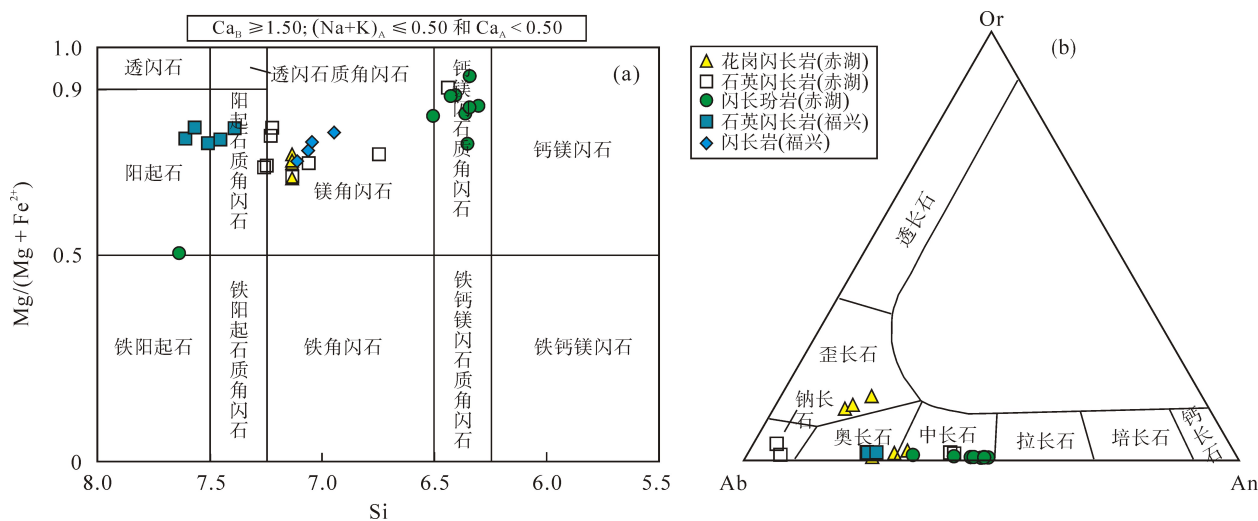


图 3 角闪石分类图解(a, 据 Leake *et al.*^[44]), 长石的 Or-Ab-An 图解(b, 据 Deer *et al.*^[45])

Fig.3 The classification diagram of amphiboles, from Leake *et al.*^[44] (a); Ab-An-Or ternary diagram for feldspar, from Deer *et al.*^[45] (b)

表 2 矿区斜长石的电子探针分析结果(%)

Table 2 Electron microprobe analyses (%) of plagioclase from the Chihu and Fuxing copper district																					
点号	CH46-1-1	CH46-1-2	CH46-1-3	CH46-1-5	CH46-1-6	CH46-1-7	CH46-5-4	CH48-1	CH48-4	FX5-1	FX5-3	FX5-5	FX5-6	CH42-1	CH42-2	CH42-3	CH42-4	CH42-5	CH42-6	CH42-7	CH42-8
SiO ₂	62.13	63.62	62.73	60.05	59.80	59.09	60.77	62.29	61.00	57.96	58.33	66.51	67.98	57.17	55.90	56.48	56.23	54.93	56.40	56.36	59.45
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	24.16	24.47	23.85	23.09	23.93	23.20	23.49	23.32	23.04	26.42	25.95	20.14	20.21	26.10	27.07	27.73	27.42	27.80	26.52	26.31	24.79
FeO	0.34	0.37	0.26	0.16	0.20	0.19	0.20	0.17	0.28	0.29	0.51	0.43	0.29	0.20	0.17	0.16	0.23	0.17	0.16	0.13	0.21
MnO	0.00	0.03	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
MgO	0.40	0.40	0.13	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02
CaO	3.06	3.01	2.83	5.79	6.60	6.50	5.89	5.00	5.38	8.60	8.45	1.41	0.98	9.08	10.31	10.60	10.24	10.57	10.02	9.74	7.41
Na ₂ O	7.79	6.05	8.00	9.23	8.49	7.41	9.10	8.48	9.23	6.47	6.58	10.65	10.49	6.83	6.04	6.01	6.54	6.36	5.87	6.37	7.98
K ₂ O	2.15	2.07	2.00	0.15	0.33	0.40	0.36	0.32	0.37	0.28	0.32	0.23	0.68	0.18	0.13	0.13	0.15	0.12	0.14	0.14	0.24
Total	100.03	100.01	99.80	98.58	99.47	96.85	100.00	99.59	99.41	100.05	100.20	99.42	100.64	99.62	99.66	101.21	100.99	100.02	99.33	99.10	100.15
以 8 个氧原子为基准																					
Si	2.759	2.866	2.792	2.687	2.666	2.724	2.688	2.778	2.710	2.599	2.613	2.940	2.974	2.567	2.520	2.509	2.495	2.459	2.560	2.551	2.640
Ti	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000
Al	1.264	1.300	1.251	1.218	1.257	1.261	1.224	1.226	1.206	1.396	1.370	1.049	1.042	1.381	1.438	1.452	1.434	1.467	1.418	1.403	1.298
Fe	0.013	0.014	0.010	0.006	0.007	0.007	0.007	0.006	0.010	0.011	0.019	0.016	0.010	0.007	0.006	0.006	0.008	0.006	0.006	0.005	0.008
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mg	0.026	0.027	0.008	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
Ca	0.146	0.145	0.135	0.277	0.315	0.321	0.279	0.239	0.256	0.413	0.406	0.067	0.046	0.437	0.498	0.504	0.487	0.507	0.487	0.472	0.353
Na	0.670	0.528	0.690	0.801	0.734	0.662	0.781	0.733	0.795	0.562	0.571	0.913	0.889	0.595	0.528	0.518	0.563	0.552	0.517	0.559	0.687
K	0.122	0.119	0.113	0.009	0.018	0.023	0.020	0.018	0.021	0.016	0.018	0.013	0.038	0.010	0.007	0.007	0.008	0.007	0.008	0.008	0.013
An	15.5	18.3	14.4	25.5	29.5	31.9	25.8	24.1	23.9	41.7	40.8	6.7	4.7	41.9	48.2	49.0	46.0	47.6	48.1	45.4	33.5
Ab	71.5	66.7	73.5	73.7	68.7	65.8	72.3	74.1	74.2	56.7	57.4	92.0	91.4	57.1	51.1	50.3	53.2	51.8	51.1	53.8	65.2
Or	13.0	15.0	12.1	0.8	1.7	2.3	1.9	1.8	1.9	1.6	1.8	1.3	3.9	1.0	0.7	0.7	0.8	0.6	0.8	0.8	1.3

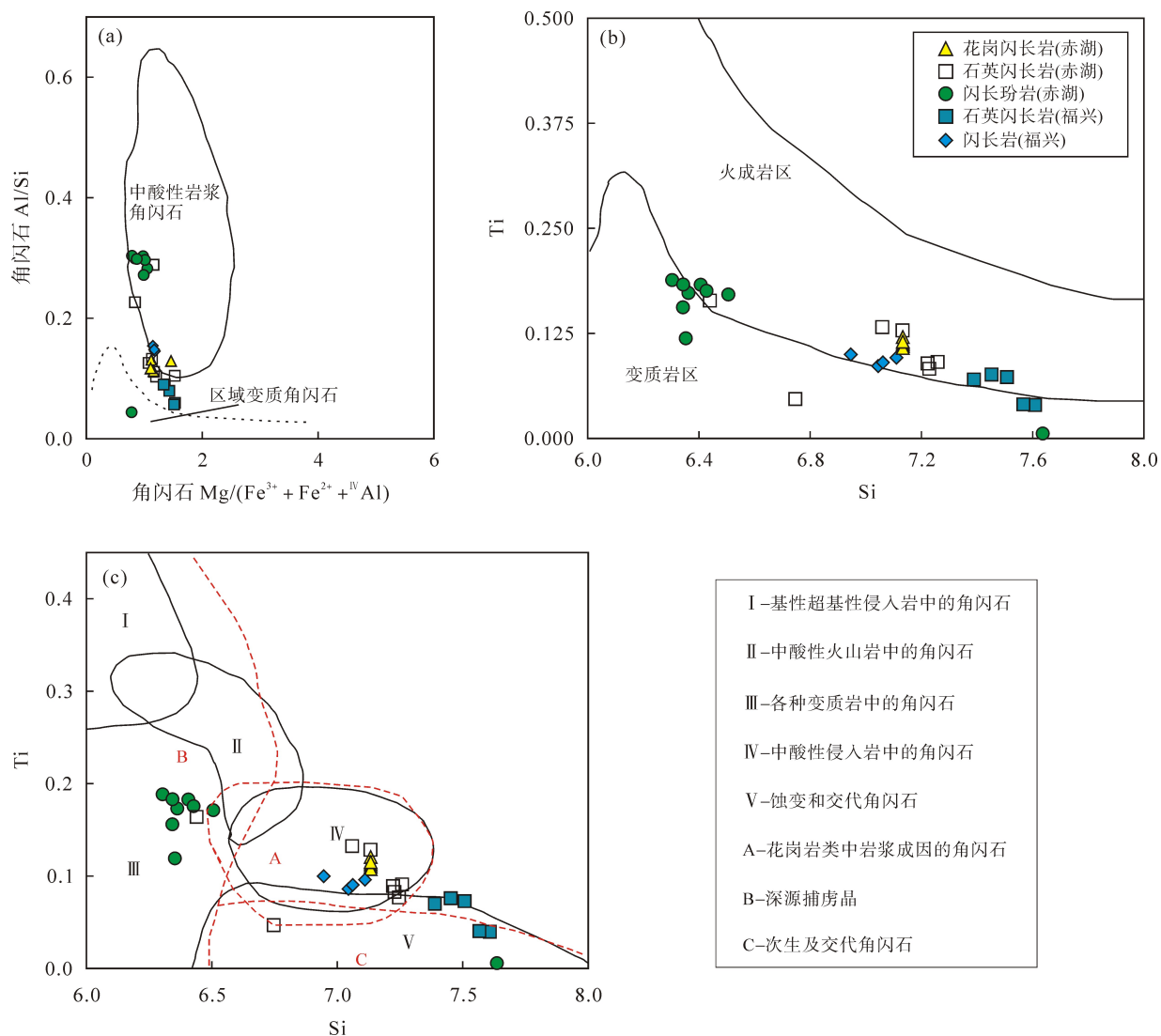


图 4 角闪石的 $Mg/(Fe^{3+}+Fe^{2+}+^{IV}Al)$ -Al/Si 图解(a, 据薛君治等^[46]); 角闪石的 Ti-Si 变异图解(b, 据 Leake^[47]); 角闪石的 Ti-Si 变异图解(据马昌前等^[48])

Fig. 4 $Mg/(Fe^{3+}+Fe^{2+}+^{IV}Al)$ -Al/Si diagram of hornblende, from Xue *et al.*^[46] (a); Ti-Si variation diagram of hornblende, from Leake^[47] (b); Ti-Si variation diagram of hornblende, from Ma *et al.*^[48] (c)

在角闪石的 Na_2O - SiO_2 图解(图 5a)中, 闪长玢岩的角闪石和赤湖石英闪长岩中的 CH48-2 和 CH48-3 落入俯冲带上方的角闪石区域, 为“S 型角闪石”, 表明形成于俯冲带之上的地幔楔^[17], 即成因与地幔楔岩浆演化有关。这与 TiO_2 - Al_2O_3 图解之间具有很好的一致性(图 5c)。而角闪石的 AK- Al^{IV} 图解也显示矿区的角闪石与钙碱性岩浆平衡, 其寄主岩属钙碱性系列(图 5b)。因此, 赤湖和福兴铜矿区岩体的形成与俯冲作用有着密切的联系。

4.2 岩浆结晶的温度、压力、氧逸度和湿度(含水量)

前人研究表明, 固溶体中钙镁闪石(切尔马克分子)的替代反应与温度和压力有关^[41,48,50,51]。控制钙

质角闪石成分的主要替代反应有以下 4 种: 分别为与压力有关的 Al-钙镁闪石替代反应; 与温度有关的 Ti-钙镁闪石替代反应; 与温度有关的斜长石替代反应和与温度有关的浅闪石替代反应^[52], 具体反应见图 6。本文角闪石的电子探针数据以 23 个氧原子为基准, 采用阳离子总和为 13 进行标准化处理计算结构式(表 1)^[44]。计算结果的线性回归分析表明(图 6), 赤湖和福兴铜矿区岩体中的角闪石替代反应机制同时受 Al-钙镁闪石替代反应和 Ti-钙镁闪石替代反应的控制(图 6a 和 6b)。斜长石替代反应机制受同结晶斜长石的 An 和 Ab 组分的变化所控制^[53], 斜长石替代反应的线性相关度较差表明其对角闪石的成分变化几乎没有影响(图 6c)。

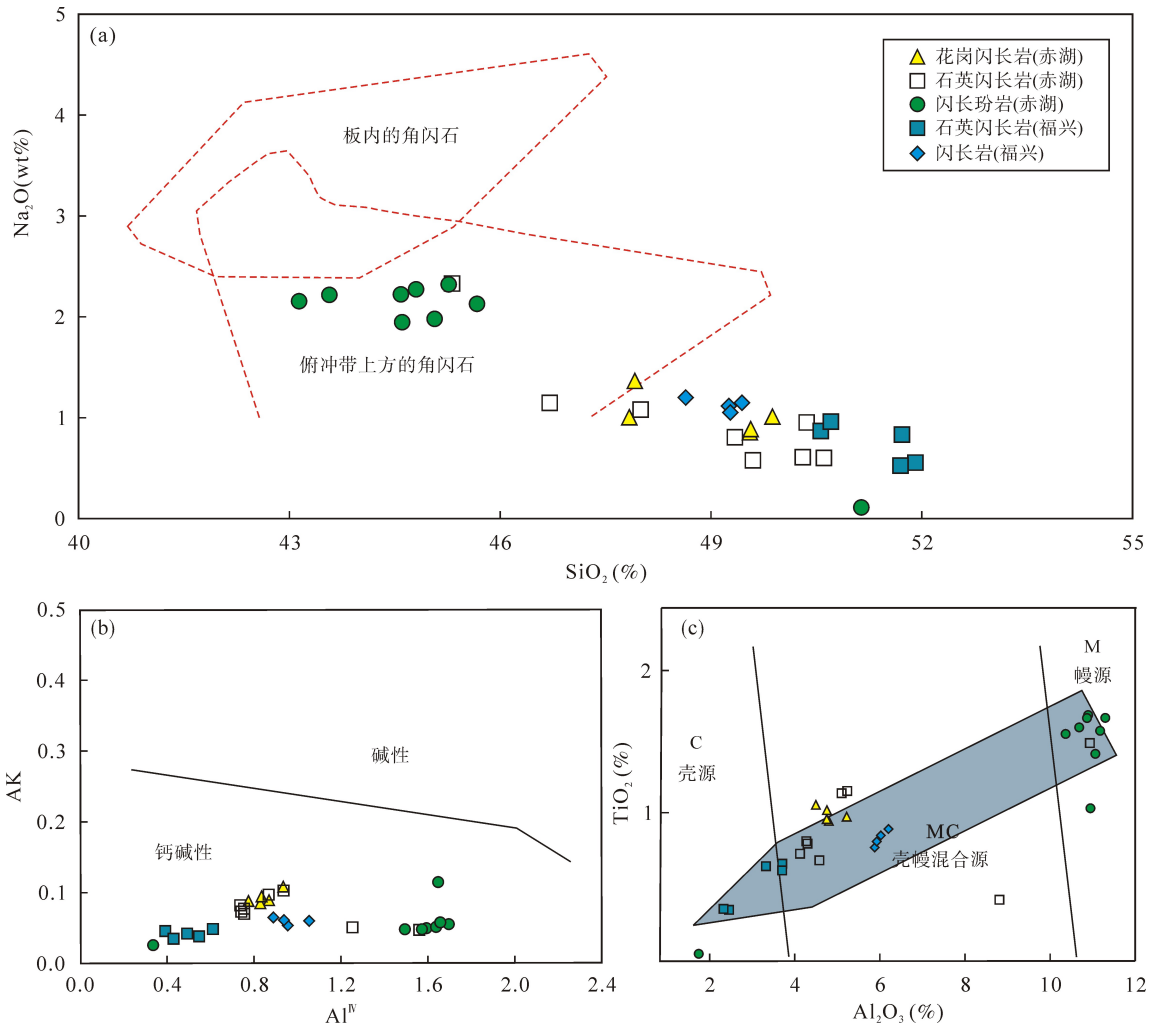


图5 角闪石的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(a, 据 Coltorti *et al.*^[17]); 角闪石的 $\text{AK}-\text{Al}^{\text{IV}}$ 图解(b, 据 Ridolfi *et al.*^[41]); 角闪石的 $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(c, 据陈光远等^[50])

Fig.5 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram of hornblende, from Coltorti *et al.*^[17] (a); $\text{AK}-\text{Al}^{\text{IV}}$ diagram of hornblende, after Ridolfi *et al.*^[41] (b); $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of hornblende, after Chen *et al.*^[50] (c)

钙质岩浆角闪石与其他常见硅酸盐矿物相比, 由于其成分差异很大, 可能记录了岩浆的成分、温度和压力, 因此适用于研究岩浆过程^[14,25]。对钙质火成角闪石的大量研究表明: 角闪石中的全铝含量($^{\text{T}}\text{Al}$)与结晶压力之间具有良好的线性关系, 进而提出了许多经验或者实验标定的全铝压力计以及斜长石-角闪石温度计^[40,42,43,54], 这些温压计在花岗质岩石近固相线条件下确实有效, 但是这些温压计的准确应用大多需要严格的限制条件, 比如温压区间、矿物共生组合和成分限定^[14,55-58]。

最近, Ridolfi *et al.*^[15]对前人的实验数据和温压力计进行经验标定, 并结合地震学资料, 提出了仅与角闪石成分相关的温压计、氧逸度计和湿度计, 公式分别为:

$$t(^{\circ}\text{C}) = -151.487\text{Si}^* + 2041 \quad (R^2 = 0.84)$$

式中: $\text{Si}^* = \text{Si} + (\text{Al}^{\text{IV}}/15) + 2^{\text{IV}}\text{Ti} - (\text{Al}^{\text{VI}}/2) - (\text{Ti}^{\text{IV}}/1.8) + (\text{Fe}^{3+}/9) + (\text{Fe}^{2+}/3.3) + (\text{Mg}/26) + (\text{Ca}^{\text{B}}/5) + (\text{Na}^{\text{B}}/1.3) - (\text{Na}^{\text{A}}/15) + (\text{空位}^{\text{A}}/2.3)$;

$$p(\text{MPa}) = 19.209 \exp(1.438^{\text{T}}\text{Al}) \quad (R^2 = 0.99)$$

$$\Delta\text{NNO} = 1.644 \text{Mg}^* - 4.01 \quad (R^2 = 0.89)$$

式中: $\text{Mg}^* = \text{Mg} + (\text{Si}/47) - (\text{Al}^{\text{VI}}/9) - 1.3^{\text{IV}}\text{Ti} + (\text{Fe}^{3+}/3.7) + (\text{Fe}^{2+}/5.2) - (\text{Ca}^{\text{B}}/20) - (\text{Na}^{\text{A}}/2.8) + (\text{空位}^{\text{A}}/9.5)$;

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}(\%) = 5.215^{\text{[6]}}\text{Al}^* + 12.28 \quad (R^2 = 0.83)$$

式中: $^{\text{[6]}}\text{Al}^* = ^{\text{VI}}\text{Al} + (\text{Al}^{\text{IV}}/13.9) - ((\text{Si} + \text{Ti}^{\text{VI}})/1.8) - (\text{Fe}^{2+\text{C}}/3) - (\text{Mg}/1.7) + ((\text{Ca}^{\text{B}} + \text{空位}^{\text{A}})/1.2) + (\text{Na}^{\text{A}}/2.7) - 1.56 \text{K} - (\text{Fe}^{\#}/1.6)$ 。

此温压计适用于 $\text{Al}^{\#} \leq 0.21$ ($\text{Al}^{\#} = ^{\text{VI}}\text{Al}/^{\text{T}}\text{Al}$) 的角闪石, 这扩大了角闪石温压计的使用范围, Ridolfi *et al.*^[41]还对其进行了重新修订, 使其应用范围更大。值得注意的是, 该温压计的提出是基于与俯冲相关的钙碱性火山岩中的角闪石, 因此可以利用斑

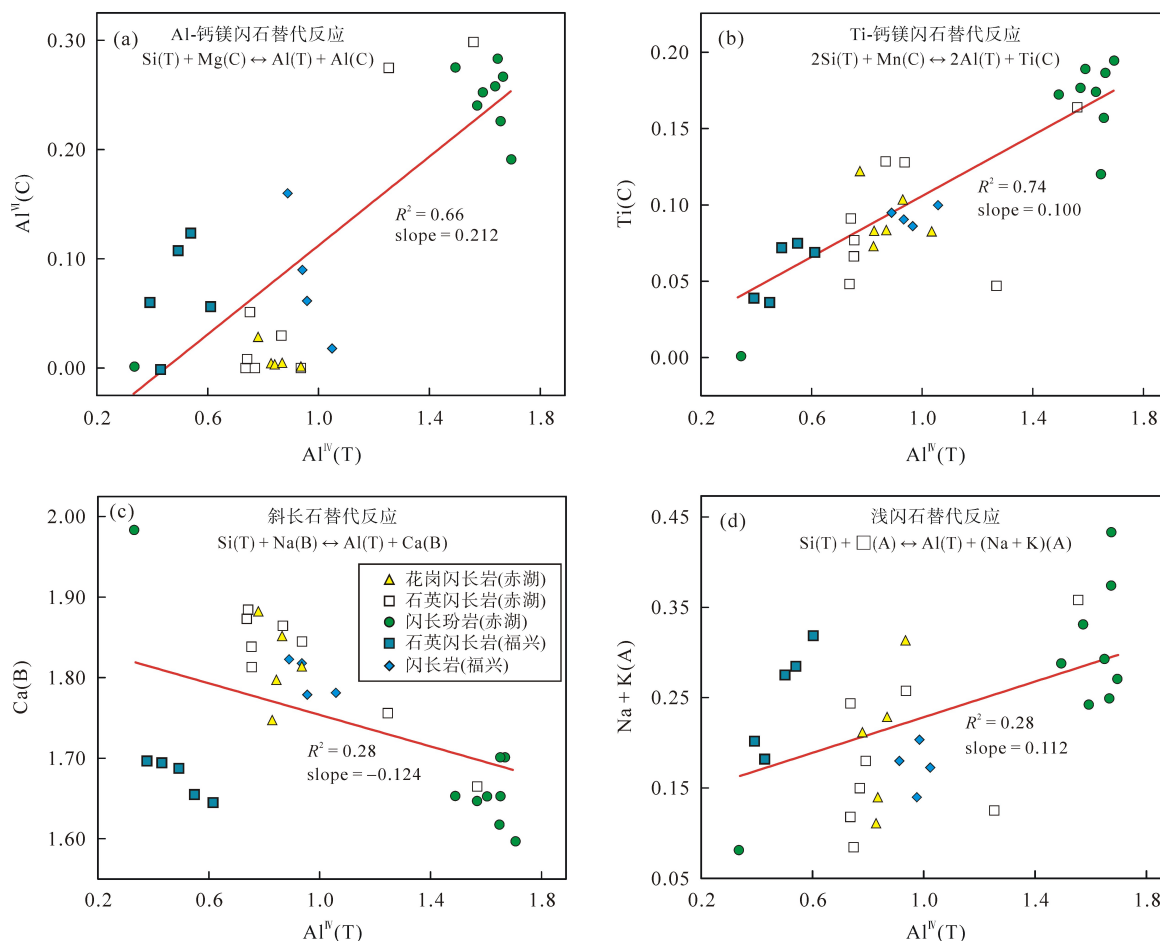


图 6 角闪石阳离子的替代反应图解

Fig.6 Substitution mechanisms in hornblendes from Chihu and Fuxing copper district

(a) 与压力有关的 Al-钙镁闪石替代反应; (b) 与温度有关的 Ti-钙镁闪石替代反应; (c) 与温度有关的斜长石替代反应; (d) 与温度有关的浅闪石替代反应。

(a) The pressure-sensitive Al-tschermak substitution; (b) the temperature-sensitive Ti-tschermak substitution; (c) the temperature-sensitive plagioclase substitution; (d) the temperature-sensitive edenite substitution.

晶角闪石示踪火山系统深部岩浆房的物化条件。但是 Zhang *et al.*^[28]用该温压计对闪长岩和闪长玢岩中角闪石斑晶的边部或者基质中的角闪石进行计算发现, 其结果与侵入体上覆地层厚度、黑云母-角闪石 *p-t* 图解^[50]和黑云母 Ti-Mg/(Mg + Fe)图解^[59]所获得的结果一致; 此外, 栾燕等^[60]利用上述公式对层状侵入体中的角闪石计算了氧逸度, 与金云母所示踪的氧逸度具有很好的一致性, 因此该角闪石成分物化条件计算公式可能也适用于等粒状花岗岩类形成物化条件的确定。

由于矿区岩体中的角闪石矿物组合不完全满足角闪石全铝压力计所推荐的要求, 而且共生斜长石次生蚀变的影响较大, 因此本文利用 Ridolfi *et al.*^[15]所提供的 excel 程序(AMP-TB.xls), 以及 Ridolfi *et al.*^[15]和 Ridolfi *et al.*^[41]所提出的温压计算公式, 并且剔除次生蚀变的点, 然后进行结晶温压及氧逸度

和湿度的计算。结果表明赤湖花岗闪长岩的结晶温度为 741~772 °C, 压力为 40~90 MPa (0.4~0.9 kbar), $\lg f_{O_2}$ 为 -12.9 ~ -13.8, 熔体中的水含量为 3.8%~4.4%; 赤湖石英闪长岩的结晶温度为 643~780 °C, 压力为 30~70 MPa (0.3~0.7 kbar), $\lg f_{O_2}$ 为 -12.3 ~ -13.8, 熔体中的水含量为 3.8%~4.8%; 福兴石英闪长岩的结晶温度为 640~775 °C, 压力为 30~60 MPa (0.3~0.6 kbar), $\lg f_{O_2}$ 为 -12.7 ~ -13.6, 熔体中的水含量为 3.6%~4.7%; 福兴闪长岩的结晶温度为 640~785 °C, 压力为 60~80 MPa (0.6~0.8 kbar), $\lg f_{O_2}$ 为 -12.4 ~ -13.1, 熔体中的水含量为 4.8%~5.5%; 赤湖闪长玢岩中角闪石结晶温度为 880~918 °C, 压力为 24~45 MPa (2.4~4.5 kbar), $\lg f_{O_2}$ 为 -10.2 ~ -11.1, 结晶时熔体中的水含量为 6.4%~7.0%, 其中赤湖石英闪长岩中的幔源角闪石与闪长玢岩中的斑晶角闪石形成的物理化学条件相似(图 7a~7c)。

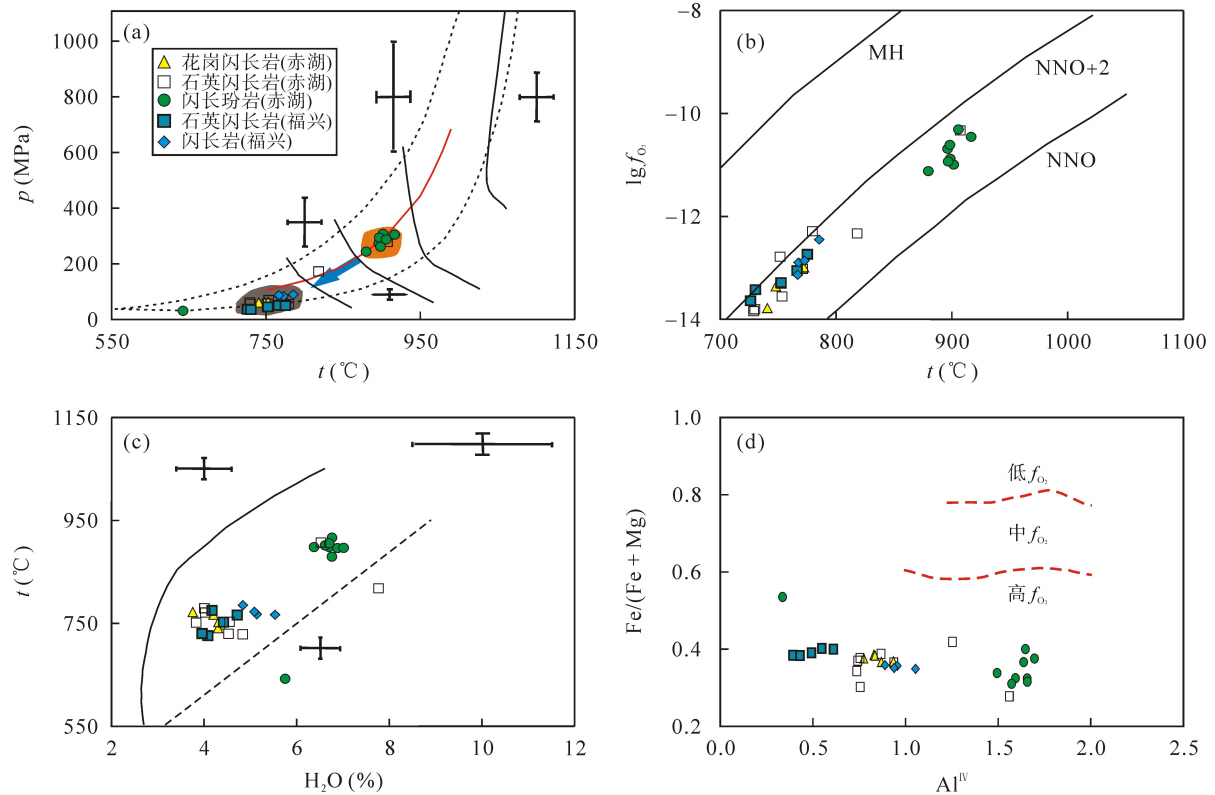


图7 角闪石形成的物理化学条件图解

Fig.7 The diagram showing the formation of physicochemical conditions for hornblende

(a) p - t 图解(据 Ridolfi *et al.*^[15]); (b) $\lg f_{O_2}$ - t 图解(据 Ridolfi *et al.*^[15]); (c) t - H_2O_{melt} 图解(据 Ridolfi *et al.*^[15]); (d) 角闪石的 $Fe/(Fe + Mg)$ - Al^{IV} 图解(据 Anderson *et al.*^[43])
 (a) p - t diagram for hornblende (from Ridolfi *et al.*^[15]); (b) $\lg f_{O_2}$ - t diagram for hornblende (from Ridolfi *et al.*^[15]); (c) t - H_2O_{melt} diagram for hornblende (from Ridolfi *et al.*^[15]); (d) Hornblende $Fe/(Fe + Mg)$ - Al^{IV} diagram showing the possible oxygen conditions crystallization (from Anderson *et al.*^[43]).

4.3 岩浆演化及成矿过程探讨

赤湖铜矿区闪长玢岩中的角闪石和斜长石环带现象十分发育(图 8a 和 8e), 环带记录了岩浆熔体在结晶过程中物理化学条件的变化, 因此环带角闪石和斜长石是岩浆演化过程中重要的指示矿物^[54,61,62]。研究表明, 熔体中的 Mg 和 Fe 进入斜长石的程度取决于氧逸度、温度、An 含量和水含量; 进入斜长石中的 Fe 随着氧逸度的降低而降低, 而与温度和 An 含量则成负相关关系^[63]。熔体中水含量和温度的升高以及富钙质岩浆的加入会使斜长石的 An 值升高, 降温、减压和去气作用则会降低 An 值^[61-63]。赤湖闪长玢岩中的环带斜长石核部和边部 An 值降低, 幔部升高, 而 Fe 含量刚好相反(图 8b、8d), 即从核部到边部先降低, 后升高。总体呈现中小程度变化, 表明斜长石在结晶过程中, 体系岩浆动力学机制(岩浆对流、去气和热转换等)可能控制其环带变化, 例如结晶过程中晶体潜热能的释放使温度升高^[63], 或者发生一定程度的去气作用, 对于是

否有后期岩浆的重新注入, 则需要微量元素(Sr、Ba)的变化进行进一步限定^[61]。

角闪石从核部到边部的成分剖面显示(图 8f 和 8g), MgO 和 FeO、TiO₂ 和 K₂O 具有良好的负相关关系, 表明角闪石环带的成因可能受其控制, Na₂O 的变化显示岩浆演化晚期可能相对富 Na。体系温度、压力和氧逸度从核部往外先升高, 然后降低, 随后震荡变化趋于平稳。因此角闪石可能是在一个不稳定的深部岩浆房体系结晶, 然后被携带进入地壳浅部。而熔体中的水含量始终保持较低程度的震荡变化, 说明角闪石形成时没有明显去气作用的发生。

闪长玢岩中的角闪石主要呈斑晶和基质产出, 本文针对其斑晶进行成分分析, 以此反映角闪石形成时深部岩浆房的物化条件, 而非就位时的物理化学条件; 其他等粒状花岗岩类岩石中角闪石形成时的物化条件就代表岩体就位时的条件, 结合闪长玢岩被其他花岗岩类侵入的接触关系, 就可以通过角闪石示踪从深部形成到浅部就位的成岩成矿过程, 但是目前全铝压力计对于压力的估计不确定度大,

有时相当于数千米的误差。数据也显示, 赤湖和福兴铜矿区岩体中角闪石所反映的物理化学参数可以明显的分为两个不同的组合(图 7a~7c), 闪长玢岩中斑晶角闪石形成的温度、压力、氧逸度和挥发分相对较高, 而矿区其他岩体形成的物化条件相似, 与

闪长玢岩中的角闪石相反, 说明它们形成于不同深度的岩浆房。但是他们都具有高的氧逸度(图 7d), 其相对氧逸度在 $\Delta\text{NNO}+1\sim\Delta\text{NNO}+2$ 之间(图 7b)。基于此, 我们提出了一个赤湖和福兴铜矿区岩浆演化和矿床形成过程的模型(图 9)。首先来自地幔楔的俯冲

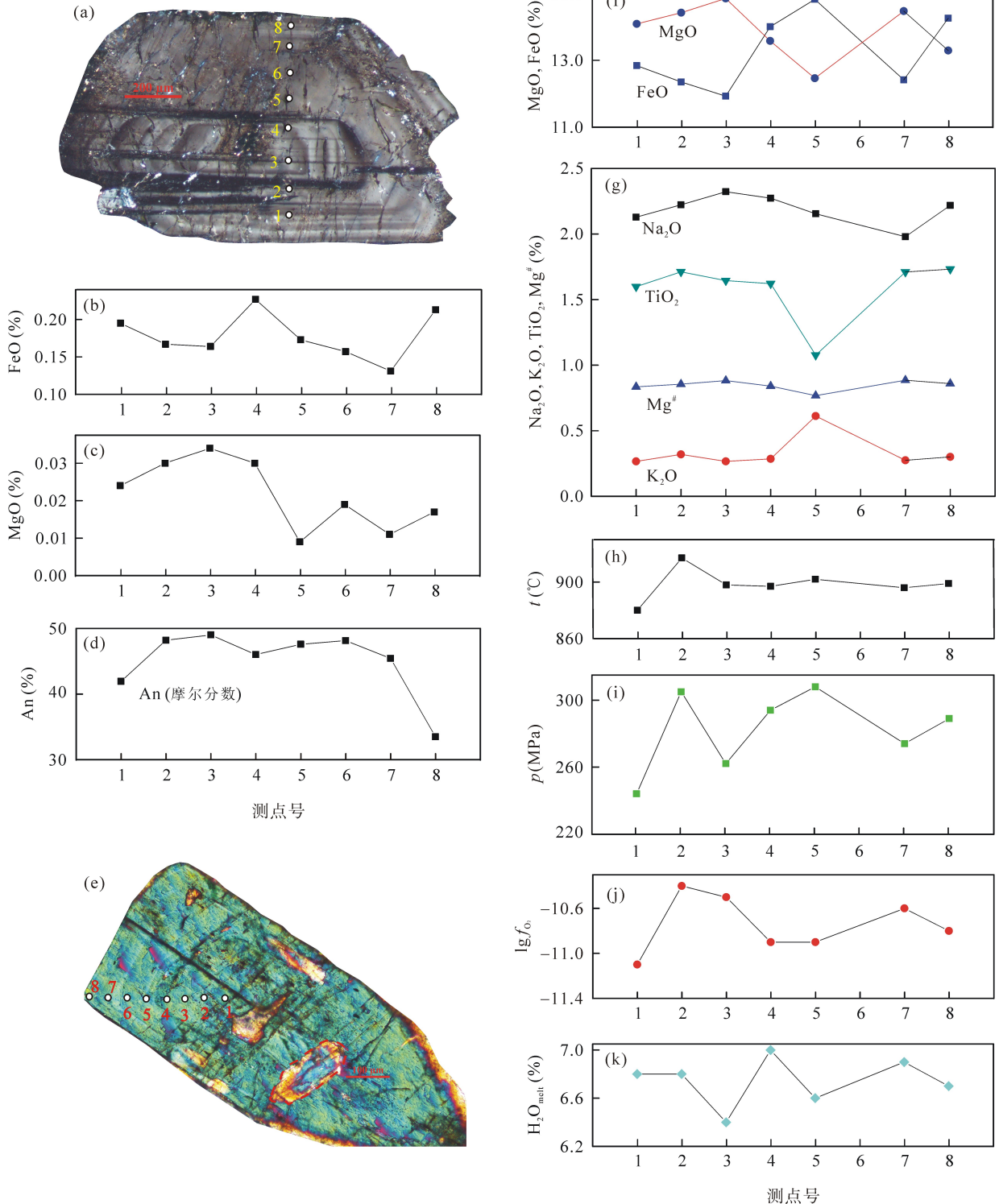


图 8 赤湖铜矿区闪长玢岩中环带斜长石和角闪石的成分剖面图

Fig.8 The compositional zoning of plagioclase and hornblende in diorite porphyry from Chihu copper district

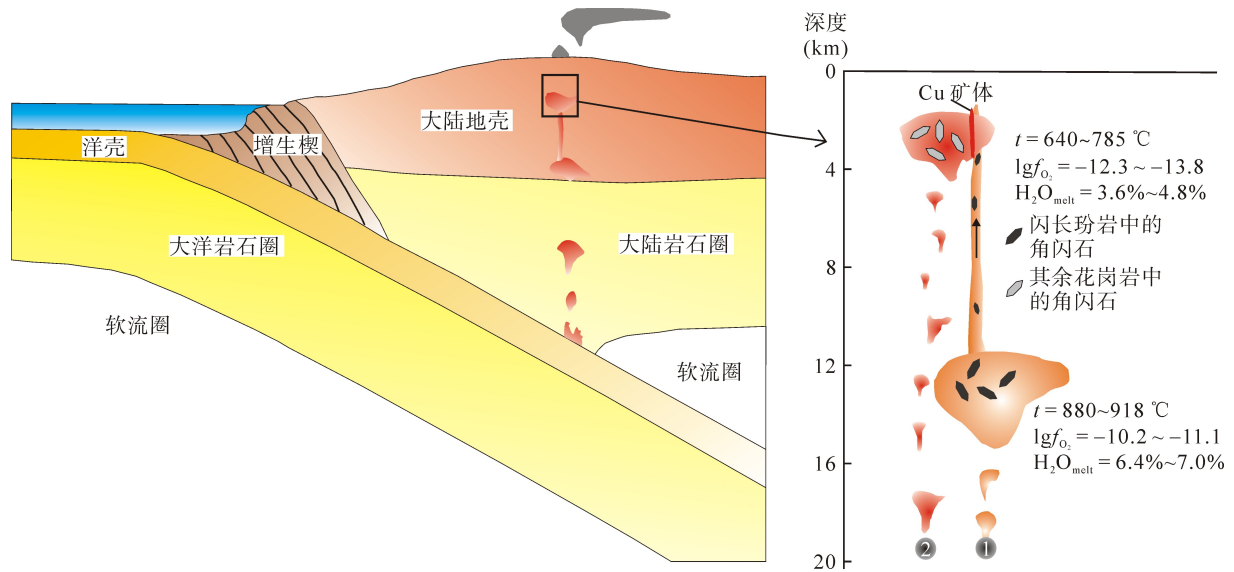


图9 赤湖和福兴铜矿区岩浆演化和成矿过程模式图

Fig.9 Schematic modal of magmatism and mineralization in the Chihu and Fuxing copper district

带岩浆沿通道上升至地壳较深部位, 在 9~15 km 处的较深部岩浆房结晶形成闪长玢岩中的角闪石(深度计算取地壳的平均密度 2.7 g/cm^3), 此时岩浆体系的温度约为 $880\sim 918 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lg f_{\text{O}_2}$ 和熔体中的水含量分别为 $-10.2 \sim -11.1$ 和 $6.4\% \sim 7.0\%$ 。在这个过程中, 由于本身体系氧逸度和水含量高, 高氧逸度的岩浆使其中的 S 倾向于以氧化态存在(SO_2 或 SO_4^{2-}), 因此有利于来自俯冲带的成矿物质(Cu、Mo 和 Au 等亲硫元素)进入熔体中而发生运移^[64-66], 从而抑制了成矿物质在岩浆演化早期发生结晶, 使其具有很大的成矿潜力。随后残余岩浆继续上升, 并且携带已形成的角闪石向上运移到地壳浅部侵位形成闪长玢岩, 上升过程中温度和压力降低, 氧逸度则逐渐降低, 熔体中的水含量减少, 这个过程可能是快速的, 温度压力的快速下降导致水从岩浆熔体中逐渐出溶形成流体, 此过程可能形成少量的含矿流体; 当岩浆上升到 1~3 km 深度的浅部岩浆房时(深度计算取地壳的平均密度 2.7 g/cm^3), 花岗闪长岩、石英闪长岩和闪长岩及其角闪石开始结晶形成, 此时岩浆的温度为 $640\sim 785 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lg f_{\text{O}_2}$ 和熔体中的水含量分别为 $-12.3 \sim -13.8$ 和 $3.6\% \sim 4.8\%$ 。尽管此时岩浆的氧逸度相对小于闪长玢岩中角闪石形成时的氧逸度, 但是氧逸度仍然较高(相对氧逸度在 $\Delta\text{NNO}+1$ 以上), 因此成矿元素仍倾向于进入熔体(流体)相中, 并没有发生矿质的沉淀。至于岩浆上升到地壳浅部导致氧逸度降低, 可能是由于磁铁矿的结晶^[65], 外部 H_2S 的加入, 或者发生水岩反应^[67], 具体原因还需

进一步研究, 但是氧逸度降低显然对矿质沉淀具有促进作用。最后由于温度、压力和氧逸度等条件的继续降低, 体系从氧化状态逐渐变为还原状态, 硫在流体中逐渐转变为 HS^- , 从而使富含矿质的成矿流体在浅部岩浆房上部发生沉淀, 形成具有经济意义的铜矿床。

5 结论

(1) 矿区角闪石的类型主要为镁角闪石、钙镁闪石质角闪石和次生阳起石; 其中赤湖花岗闪长岩和福兴闪长岩中的角闪石为岩浆成因, 赤湖石英闪长岩中角闪石部分遭受次生改造, 福兴石英闪长岩中的角闪石均遭受次生改造, 闪长玢岩的角闪石为深源捕虏; 矿区岩体的形成多有幔源物质的参与, 且与俯冲作用具有密切联系。

(2) 赤湖闪长玢岩中角闪石结晶的压力为 $244\sim 451 \text{ MPa}$ ($2.44\sim 4.51 \text{ kbar}$), 对应深度为 9~15 km, 温度为 $880\sim 918 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lg f_{\text{O}_2}$ 和熔体中的水含量分别为 $-10.2 \sim -11.1$ 和 $6.4\% \sim 7.0\%$; 赤湖花岗闪长岩、石英闪长岩和福兴石英闪长岩、闪长岩形成的压力为 $30\sim 90 \text{ MPa}$ ($0.3\sim 0.9 \text{ kbar}$), 对应侵位深度为 1~3 km, 温度为 $640\sim 785 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lg f_{\text{O}_2}$ 和熔体中的水含量分别为 $-12.3 \sim -13.8$ 和 $3.6\% \sim 4.8\%$ 。

(3) 赤湖和福兴铜矿区的岩体中的角闪石可能形成于两个岩浆房, 首先俯冲带幔源岩浆在深部岩浆房形成闪长玢岩中的角闪石, 然后被岩浆一起携

带上升到浅部形成闪长玢岩; 此后演化岩浆在浅部岩浆房形成闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩及其角闪石, 并伴随着流体从岩浆熔体中逐渐出溶和深部成矿元素进入熔体(流体)中而发生运移; 最终由于物化条件的逐渐改变, 矿质在浅部岩浆房的上部发生沉淀, 从而形成铜矿床。

本文受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)和中国科学院“百人计划”项目(批准号: Y333081A07)联合资助。电子探针实验分析得到了中国科学院广州地球化学研究所邢长明和陈林丽老师的帮助; 矿物温压计方面得到了李小伟、赛盛勋和豆敬兆的帮助; 两位审稿人和编辑提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] Xiao B, Chen H Y, Hollings P, Han J S, Wang Y F, Yang J T, Cai K D. Magmatic evolution of the Tuwu-Yandong porphyry Cu belt, NW China: Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. *Gondw Res*, 2017, 43: 74–91.
- [2] Wang Y H, Xue C J, Liu J J, Wang J P, Yang J T, Zhang F F, Zhao Z N, Zhao Y J, Liu B. Early Carboniferous adakitic rocks in the area of the Tuwu deposit, eastern Tianshan, NW China: Slab melting and implications for porphyry copper mineralization [J]. *J Asian Earth Sci*, 2015, 103: 332–349.
- [3] Wang Y H, Xue C J, Wang J P, Yang J T, Zhang F F, Zhao Z N, Zhao Y J. Petrogenesis of magmatism in the Yandong region of Eastern Tianshan, Xinjiang: geochemical, geochronological, and Hf isotope constraints [J]. *Int Geol Rev*, 2015, 57(9/10): 1130–1151.
- [4] Shen P, Pan H D, Zhou T F, Wang J B. Petrography, geochemistry and geochronology of the host porphyries and associated alteration at the Tuwu Cu deposit, NW China: A case for increased depositional efficiency by reaction with mafic hostrock? [J]. *Miner Deposita*, 2014, 49(6): 709–731.
- [5] Shen P, Pan H D, Dong L H. Yandong porphyry Cu deposit, Xinjiang, China — Geology, geochemistry and SIMS U-Pb zircon geochronology of host porphyries and associated alteration and mineralization [J]. *J Asian Earth Sci*, 2014, 80: 197–217.
- [6] Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z, Zhang Q. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry [J]. *Miner Deposita*, 2006, 41(2): 188–200.
- [7] Han C M, Xiao W J, Zhao G C, Mao J W, Yang J M, Wang Z L, Yan Z, Mao Q G. Geological characteristics and genesis of the Tuwu porphyry copper deposit, Hami, Xinjiang, Central Asia [J]. *Ore Geol Rev*, 2006, 29(1): 77–94.
- [8] 李洁, 钟军伟, 于洋, 黄小龙. 赣南西华山花岗岩的云母成分特征及对岩浆演化与成矿过程的指示[J]. *地球化学*, 2013, 42(5): 393–404.
- [9] Li Jie, Zhong Jun-wei, Yu Yang, Huang Xiao-long. Insights on magmatism and mineralization from micas in the Xihuashan granite, Jiangxi Province, South China [J]. *Geochimica*, 2013, 42(5): 393–404 (in Chinese with English abstract).
- [9] 江宏君, 陈华勇, 韩金生, 张维峰, 陆万俭. 东天山沙泉子铁铜矿床矿物学特征及其成矿意义[J]. *地球化学*, 2016, 45(4): 329–355.
- [10] Jiang Hong-jun, Chen Hua-yong, Han Jin-sheng, Zhang Wei-feng, Lu Wan-jian. Mineralogy of the Shaquanzi Fe-Cu deposit, eastern Tianshan and its metallogenic implications [J]. *Geochimica*, 2016, 45(4): 329–355 (in Chinese with English abstract).
- [10] Anderson J L, Barth A P, Wooden J L, Mazdab F. Thermometers and thermobarometers in granitic systems [J]. *Rev Mineral Geochem*, 2008, 69(1): 121–142.
- [11] Bi X W, Hu R Z, Hanley J J, Mungall J E, Peng J T, Shang L B, Wu K X, Yan S, Li H L, Hu X Y. Crystallisation conditions (T, P, f_{O_2}) from mineral chemistry of Cu- and Au-mineralised alkaline intrusions in the Red River–Jinshajiang alkaline igneous belt, western Yunnan Province, China [J]. *Mineral Petrol*, 2009, 96(1): 43–58.
- [12] Hossain I, Tsunigae T. Crystallization conditions and petrogenesis of the paleoproterozoic basement rocks in Bangladesh: An evaluation of biotite and coexisting amphibole mineral chemistry [J]. *J Earth Sci*, 2014, 25(1): 87–97.
- [13] Li X W, Mo X X, Scheltens M, Guan Q. Mineral chemistry and crystallization conditions of the Late Cretaceous Mamba pluton from the eastern Gangdese, Southern Tibetan Plateau [J]. *J Earth Sci*, 2016, 27(4): 1–26.
- [14] Putirka A K. Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes [J]. *Am Mineral*, 2016, 101(4): 841–858.
- [15] Ridolfi F, Renzulli A, Puerini M. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2010, 160(1): 45–66.
- [16] 赛盛勋, 赵天明, 王中亮, 黄锁英, 张良. 玲珑黑云母花岗岩成因: 矿物学特征约束[J]. *岩石学报*, 2016, 32(8): 2477–2493.
- [16] Sai Sheng-xun, Zhao Tian-ming, Wang Zhong-liang, Huang Suo-ying, Zhang Liang. Petrogenesis of Linglong biotite granite: Constraints from mineralogical characteristics [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2016, 32(8): 2477–2493 (in Chinese with English abstract).
- [17] Coltorti M, Bonadiman C, Faccini B, Grégoire M, O'Reilly S Y, Powell W. Amphiboles from suprasubduction and intra-plate lithospheric mantle [J]. *Lithos*, 2007, 99(1): 68–84.
- [18] 姜常义, 安三元. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. *矿物岩石*, 1984, 4(3): 1–9.
- [18] Jiang Chang-yi, An San-yuan. On chemical characteristics of

- calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance [J]. *J Mineral Petrol*, 1984, 4(3): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [19] Hossain I, Tsunogae T, Rajesh H M. Geothermobarometry and fluid inclusions of dioritic rocks in Bangladesh: Implications for emplacement depth and exhumation rate [J]. *J Asian Earth Sci*, 2009, 34(6): 731-739.
- [20] Zhang S H, Zhao Y, Song B. Hornblende thermobarometry of the Carboniferous granitoids from the Inner Mongolia Paleozoic uplift: Implications for the tectonic evolution of the northern margin of North China block [J]. *Mineral Petrol*, 2006, 87(1/2): 123-141.
- [21] 豆敬兆, 付顺, 张华锋. 胶东郭家岭岩体固结冷却轨迹与隆升剥蚀[J]. *岩石学报*, 2015, 31(8): 2325-2336.
Dou Jing-zhao, Fu Shun, Zhang Hua-feng. Consolidation and cooling paths of the Guojialing granodiorites in Jiaodong Peninsula: Implication for crustal uplift and exhumation [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2015, 31(8): 2325-2336 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陆丽娜, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 蓝廷广. 胶西北郭家岭花岗闪长岩侵位深度: 来自角闪石温压计和流体包裹体的证据[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1521-1532.
Lu Li-na, Fan Hong-rui, Hu Fang-fang, Yang Kui-feng, Lan Ting-guang. Emplacement depth of the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China: Evidence from hornblende thermobarometry and fluid inclusions [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2011, 27(5): 1521-1532 (in Chinese with English abstract).
- [23] De Angelis S H, Larsen J, Coombs M. Pre-eruptive magmatic conditions at Augustine Volcano, Alaska, 2006: Evidence from amphibole geochemistry and textures [J]. *J Petrol*, 2013, 54(9): 1939-1961.
- [24] Kiss B, Harangi S, Ntaflou T, Mason P R, Pál-Molnár E. Amphibole perspective to unravel pre-eruptive processes and conditions in volcanic plumbing systems beneath intermediate arc volcanoes: A case study from Ciomadul volcano (SE Carpathians) [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2014, 167(3): 1-27.
- [25] Erdmann S, Martel C, Pichavant M, Kushnir A. Amphibole as an archivist of magmatic crystallization conditions: problems, potential, and implications for inferring magma storage prior to the paroxysmal 2010 eruption of Mount Merapi, Indonesia [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2014, 167(6): 1-23.
- [26] Dessimoz M, Mntener O, Ulmer P. A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: the Chelan Complex (Washington Cascades) [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2012, 163(4): 567-89.
- [27] Larocque J, Canil D. The role of amphibole in the evolution of arc magmas and crust: The case from the Jurassic Bonanza arc section, Vancouver Island, Canada [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2010, 159(4): 475-492.
- [28] Zhang J Q, Li S R, Santosh M, Wang J Z, Li Q. Mineral chemistry of high-Mg diorites and skarn in the Han-Xing iron deposits of South Taihang Mountains, China: Constraints on mineralization process [J]. *Ore Geol Rev*, 2015, 64: 200-214.
- [29] Zhang F F, Wang Y H, Liu J J. Petrogenesis of Late Carboniferous granitoids in the Chihu area of Eastern Tianshan, Northwest China, and tectonic implications: Geochronological, geochemical, and zircon Hf-O isotopic constraints [J]. *Int Geol Rev*, 2016, 58(8): 949-966.
- [30] 吴华, 李华芹, 陈富文, 路远发, 邓岗, 梅玉萍, 姬厚贵. 东天山哈密地区赤湖钼铜矿区斜长花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2006, 25(5): 549-552.
Wu Hua, Li Hua-qin, Chen Fu-wen, Lu Yuan-fa, Deng Gang, Mei Yu-ping, Ji Hou-gui. Zircon SHIMP U-Pb dating of plagiogranite porphyry in the Chihu molybdenum-copper district [J]. *Geol Bull China*, 2006, 25(5): 549-552 (in Chinese with English abstract).
- [31] 李文明, 任秉琛, 杨兴科, 李友柱, 陈强. 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*, 2002, 35(4): 41-64.
Li Wen-ming, Ren Bing-chen, Yang Xing-ke, Li You-zhu, Chen Qiang. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significance in Eastern Tianshan region [J]. *Northwest Geol*, 2002, 35(4): 41-64 (in Chinese with English abstract).
- [32] Wang Y H, Zang F F, Liu J J, Que C Y. Genesis of the Fuxing porphyry Cu deposit in Eastern Tianshan, China: Evidence from fluid inclusions and C-H-O-S-Pb isotope systematics [J]. *Ore Geol Rev*, 2016, 79: 46-61.
- [33] Wang Y H, Zhang F F, Liu J J, Que C Y. Carboniferous magmatism and mineralization in the area of the Fuxing Cu deposit, Eastern Tianshan, China: Evidence from zircon U-Pb ages, petrogeochemistry, and Sr-Nd-Hf-O isotopic compositions [J]. *Gondw Res*, 2016, 34: 109-128.
- [34] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461-469.
Wang Jing-bin, Wang Yu-wang, He Zhi-jun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the Eastern Tianshan Mountains, NW China [J]. *Geol China*, 2006, 33(3): 461-469 (in Chinese with English abstract).
- [35] Mao J W, Goldfarb R J, Wang Y T, Hart C J, Wang Z L, Yang J M. Late Paleozoic base and precious metal deposits, East Tianshan, Xinjiang, China: Characteristics and geodynamic setting [J]. *Episodes*, 2005, 28(1): 23-30.
- [36] 新疆维吾尔自治区地质调查院. 新疆哈密市赤湖铜金资源评价物探报告[R]. 2004: 1-62.
Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration. The resource evaluation and geophysical exploration report of Chihu copper-gold deposit, Hami, Xinjiang [R]. 2004: 1-62 (in Chinese).
- [37] 申萍, 潘鸿迪, 董连慧, 杨俊毅, 沈远超, 代华五, 关维娜, 赵云江. 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*, 2012, 28(7): 1966-1980.
Shen Ping, Pan Hong-di, Dong Lian-hui, Yang Jun-tao, Shen Yuan-chao, Dai Hua-wu, Guan Wei-na, Zhao Yun-jiang. Caldera complex, hosted rocks and alteration of the Yandong porphyry copper deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2012, 28(7): 1966-1980 (in Chinese with English abstract).

- [38] 王志良, 毛景文, 张作衡, 左国朝, 王龙生. 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, 2006, 80(7): 943–955.
Wang Zhi-liang, Mao Jing-wen, Zhang Zuo-heng, Zuo Guo-chao, Wang Long-sheng. Geology, time distribution and metallogenic geodynamic evolution of porphyry copper (molybdenum) deposits in the Tianshan Mountains [J]. Acta Geol Sinica, 2006, 80(7): 943–955 (in Chinese with English abstract).
- [39] Blundy J D, Holland T J. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. Contrib Mineral Petrol, 1990, 104(2): 208–224.
- [40] Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry [J]. Contrib Mineral Petrol, 1994, 116(4): 433–447.
- [41] Ridolfi F, Renzulli A. Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1, 130 °C and 2.2 GPa [J]. Contrib Mineral Petrol, 2012, 163(5): 877–895.
- [42] Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer [J]. Contrib Mineral Petrol, 1992, 110(2/3): 304–310.
- [43] Anderson J L, Smith D R. The effects of temperature and f_{O_2} on the Al-in-hornblende barometer [J]. Am Mineral, 1995, 80(5/6): 549–559.
- [44] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, Birch W D, Gilbert M C, Grice J D, Hawthorne F C, Kato A, Kisch H J, Krivovichev V G, Linthout K, Laird J, Mandarino J, Maresch W V, Nickel E H, Rock N M S, Schumacher J C, Smith D C, Stephenson N C N, Ungaretti L, Whittaker E J W, Guo Y Z. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names [J]. Eur J Mineral, 1997, 9(3): 623–651.
- [45] Deer W A, Howie R A, Zussman J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals [M]. 2nd Ed. London: Longman Scientific and Technical, 1992.
- [46] 薛君治, 白学让, 陈武. 成因矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1986.
Xue Jun-zhi, Bai Xue-rang, Chen Wu. Genetic Mineralogy [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1986 (in Chinese).
- [47] Leake B E. Nomenclature of amphiboles [J]. Can Mineral, 1978, 16(4): 501–520.
- [48] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 李增田. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.
Ma Chang-qian, Yang Kun-guang, Tang Zhong-hua, Li Zeng-tian. Magma-Dynamics of Granitoids: Theory, Method and A Case Study of the Eastern Hubei Granitoids [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994 (in Chinese).
- [49] Leake B E. On aluminous and edenitic hornblendes [J]. Mineral Mag, 1971, 38(296): 389–407
- [50] 陈光远, 孙岱生, 周珣若, 邵伟, 宫润潭, 邵岳. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
Chen Guang-yuan, Sun Dai-sheng, Zhou Xun-ruo, Shao Wei, Gong Run-tan, Shao Yue. Genetic Mineralogy and Gold Mineralization of Guojialing Granodiorite in Jiaodong Region [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993 (in Chinese).
- [51] Al'meev R, Ariskin A, Ozerov A Y, Kononkova N. Problems of the stoichiometry and thermobarometry of magmatic amphiboles: An example of hornblende from the andesites of Bezmyannyi volcano, Eastern Kamchatka [J]. Geochem Int, 2002, 40(8): 723–738.
- [52] Bachmann O, Dungan M A. Temperature-induced Al-zoning in hornblendes of the Fish Canyon magma, Colorado [J]. Am Mineral, 2002, 87(8/9): 1062–1076.
- [53] Hammarstrom J M, Zen E A. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer [J]. Am Mineral, 1986, 71(11/12): 1297–313.
- [54] Shane P, Smith V C. Using amphibole crystals to reconstruct magma storage temperatures and pressures for the post-caldera collapse volcanism at Okataina volcano [J]. Lithos, 2013, 156: 159–170.
- [55] Anderson J L. Status of thermobarometry in granitic batholiths [J]. Geol Soc Am Spec Paper, 1996, 315: 125–138.
- [56] 李小伟, 黄雄飞, 黄丹峰. 花岗岩中常用压力计的应用评述[J]. 高校地质学报, 2011, 17(3): 415–422.
Li Xiao-wei, Huang Xiong-fei, Huang Dan-feng. Review on application of geobarometry for granitic rocks [J]. Geol J China Univ, 2011, 17(3): 415–422 (in Chinese with English abstract).
- [57] 汪洋. 钙碱性火成岩的角闪石全铝压力计——回顾、评价和应用实例[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 839–850.
Wang Yang. The Al-in-hornblende barometry for calc-alkaline igneous rocks: Retrospect, evaluation and application [J]. Geol Rev, 2014, 60(4): 839–850 (in Chinese with English abstract).
- [58] Putirka K D. Thermometers and barometers for volcanic systems [J]. Rev Mineral Geochem, 2008, 69(1): 61–120.
- [59] Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms [J]. Am Mineral, 2005, 90(2/3): 316–328.
- [60] 栾燕, 宋谢炎, 陈列锰, 郑文勤, 田小林, 冉启渝. 四川红格层状侵入体中角闪石和金云母的矿物学特征及其成因意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(5): 1457–1471.
Luan Yan, Song Xie-yan, Chen Lie-meng, Zheng Wen-qin, Tian Xiao-lin, Ran Qi-yu. Mineralogical features and petrogenetic significances of the hornblende and phlogopite of the Hongge layered intrusion, Sichuan Province [J]. Acta Petrol Sinica, 30(5): 1457–1471 (in Chinese with English abstract).
- [61] Ginibre C, Wrner G, Kronz A. Crystal zoning as an archive for magma evolution [J]. Elements, 2007, 3(4): 261–266.
- [62] 李原鸿, 黄方, 于慧敏, 贺治伟, 陈沙. 加勒比海小安德列斯岛弧 Kick'em Jenny 海底火山岩的斜长石成分环带: 示踪大洋岛弧岩浆房的演化[J]. 岩石学报, 2016, 32(2): 605–

616.
Li Yuan-hong, Huang Fang, Yu Hui-min, He Zhi-wei, Chen Sha. Plagioclase zoning in submarine volcano Kick'em Jenny, Lesser Antilles Arc: Insights into magma evolution processes in oceanic arc magma chamber [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2016, 32(2): 605–616 (in Chinese with English abstract).
- [63] Ruppel P, Werner G. Variable regimes in magma systems documented in plagioclase zoning patterns: El Misti stratovolcano and Andahuasi monogenetic cones [J]. *J Volcanol Geotherm Res*, 2007, 165(3): 142–162.
- [64] Sun W D, Huang R F, Li H, Hu Y B, Zhang C C, Sun S J, Zhang L P, Ding X, Li C Y, Zartman R E. Porphyry deposits and oxidized magmas [J]. *Ore Geol Rev*, 2015, 65: 97–131.
- [65] Sun W D, Liang H Y, Ling M X, Zhan M Z, Ding X, Zhang H, Yang X Y, Li Y L, Ireland T R, Wei Q R. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 103: 263–275.
- [66] 徐文刚, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋. 氧化性和还原性斑岩型矿床流体成矿特征分析[J]. *地学前缘*, 2011, 18(5): 103–120. Xu Wen-gang, Fan Hong-rui, Hu Fang-fang, Yang Kui-feng. Ore-forming fluids of the oxidized and reduced porphyry deposits [J]. *Earth Sci Front*, 2011, 18(5): 103–120 (in Chinese with English abstract).
- [67] Barton M D. *Treatise on geochemistry* [M]//Cooke D R, Hollings P, Wilkinson J J, Tosdal R M. *Geochemistry of Porphyry Deposits*. 2nd Ed. Oxford: Elsevier, 2014: 357–381.