

西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿床地质、 蚀变与矿化*

林彬¹, 陈毓川¹, 唐菊兴^{1**}, 宋扬¹, 王勤², 贺文³, 刘治博¹, 王艺云²,
李彦波⁴, 杨超⁵, 杨欢欢¹, 张乐骏⁶, 李玉彬⁷

(1 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 成都理工大学, 四川成都 610059; 3 中国地质大学, 北京 100083; 4 西藏地勘局第五地质大队, 青海格尔木 816000; 5 拉瓦尔大学, 加拿大魁北克 G1V0A6; 6 塔斯马尼亚大学卓越矿床研究中心, 澳大利亚霍巴特 7001; 7 西藏地质调查院, 拉萨 西藏 850001)

摘要 铁格隆南是班公湖-怒江成矿带西段重要的斑岩-浅成低温热液铜(金、银)矿床,也是西藏地区首个铜资源量超过1000万吨的超大型铜(金、银)矿床,其蚀变与矿化结构的精细解剖,对完善区域成矿理论和指导找矿实践有重要的指导意义。文章基于详细的野外地质调查、钻孔编录和镜下鉴定,识别出铁格隆南矿床具有斑岩和浅成低温热液叠加成矿作用特征。其中,斑岩成矿作用主要位于矿床深部及外围,以细脉状、脉状、浸染状黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿及少量辉钼矿等为主,蚀变为钾硅化、青磐岩化、黄铁绢英岩化,发育A、B、D型脉体。浅成低温热液成矿作用主要产于矿床中-浅部,叠加于斑岩成矿作用之上,以浸染状-脉状黄铁矿、硫砷铜矿、斑铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿、斯硫铜矿、雅硫铜矿、久辉铜矿等Cu-S体系矿物为特征,蚀变为高级泥化,广泛发育N脉(即高岭石或明矾石-硫化物脉)。蚀变、矿化特征及脉体穿切关系揭示,矿床成岩成矿作用可细分为岩浆期(I)、岩浆-热液期(II)和表生期(III)。成岩成矿年代学结果揭示,矿区区内闪长岩侵入时代较早(123 Ma),代表岩浆活动上限;花岗闪长斑岩(122~120 Ma)是主要的含矿斑岩,与成矿作用关系最为密切;火山岩覆盖于地表,喷发时代较晚(111 Ma),代表成矿后岩浆活动的产物。钾硅化的黑云母和黄铁绢英岩化的绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄分别(121.1±0.5) Ma、(120.8±0.9) Ma与斑岩成矿作用的辉钼矿Re-Os年龄((121.2±1.2) Ma)一致,而高级泥化的明矾石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为(117.9±1.6) Ma与浅成低温热液矿化的黄铁矿Rb-Sr年龄((117.5±1.8) Ma)一致。所以,依据时空关系,铁格隆南超大型矿床成矿作用可细分为岩浆热液成矿作用(123~119 Ma)、浅成低温热液成矿作用(118~117 Ma)和火山岩覆盖保存(111~110 Ma)3个阶段。

关键词 地质学;斑岩-浅成低温;蚀变;矿化;铁格隆南;西藏

中图分类号: P618.42

文献标志码: A

Geology, alteration and mineralization of Tiegelongnan giant Cu (Au, Ag) deposit, Tibet

LIN Bin¹, CHEN YuChuan¹, TANG JuXing¹, SONG Yang¹, WANG Qin², HE Wen³, LIU ZhiBo¹,
WANG YiYun², LI YanBo⁴, YANG Chao⁵, YANG HuanHuan¹, ZHANG LeJun⁶ and LI YuBin⁷

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4 No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and

* 本文得到国家重点研发计划-深地专项(编号:2018YFC064101)、公益性行业科研专项(编号:201511017、201511022-05)、中国地质科学院院基本科研业务费(YYWF201608)、国家自然科学基金科研项目(编号:41402178)、中国地质调查局二级项目(编号:DD20160026)和中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)项目(编号:DD20160346)联合资助

第一作者简介 林彬,男,1987年生,助理研究员,主要从事青藏高原矿产勘查和综合研究。Email: linbinlxt@sina.com

** 通讯作者 唐菊兴,男,1963年生,研究员,主要从事矿产勘查和综合研究。Email: tangjuxing@126.com

收稿日期 2015-10-01;改回日期 2018-06-05。秦思婷编辑。

Development, Golmud 816000, Qinghai, China; 6 Centre of Excellence in Ore Deposit (CODES), University of Tasmania, Hobart 7001, Tasmania, Australia; 7 Institute of Geological Survey of Tibet, Lhasa 850001, Tibet, China)

Abstract

Tiegelongnan, an important porphyry high sulfidation epithermal Cu (Au, Ag) deposit in the west of Bangong Co-Nujiang metallogenic belt, is the first giant deposit with over 10 million tons of Cu reserves in Tibet. The investigation of detailed characteristics of alteration, mineralization, and ore-forming process of the Tiegelongnan deposit is of great significance for improving the regional metallogenic theory and exploration. Based on detailed field geological survey, drilling logging and microscopy, the authors identified two kinds of mineralization, with the early porphyry mineralization overlapped by the later epithermal mineralization. Veinlet, vein and disseminated pyrite, chalcopyrite, bornite and minor molybdenite seem to constitute typical mineralizations in the depth and the outer part. Potassic, phyllic, and phyllic alterations constitute the main alterations and A, B, D types of vein occurred during the porphyry mineralization. Epithermal mineralization was mainly produced in the intermediate-shallow part, superimposed upon the porphyry mineralization and characterized by disseminated-vein pyrite, enargite, bornite, covellite, digenite, spionkopite, yarrowite, djurleite and other Cu-S series minerals. Advanced argillic alteration is typical alteration with widely developed N type veins (kaolinite or aluminum sulfide veins). The diagenesis and mineralization of the Tiegelongnan deposit can be subdivided into magmatic stage (I), magmatic hydrothermal stage (II) and supergene stage (III), according to characteristics of alteration and mineralization as well as the crosscutting relationship of veins. The intrusion of diorite porphyry occurred early (123 Ma), which represents the upper limit of magmatic activity. The granodiorite porphyry (122~120 Ma) was the main ore-bearing intrusion, which had the closest relationship with mineralization. These volcanic rocks, andesite or dacite, which erupted late (111 Ma) and covered the surface, are the products of post-mineralization magmatism. Geochronologic studies show that the ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of potassic biotite and phyllic sericite are (121.1 ± 0.5) Ma and (120.8 ± 0.9) Ma respectively, consistent with Re-Os ages (121.2 ± 1.2) Ma of molybdenite formed during porphyry mineralization. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of advanced argillic alunite is 117.9 ± 1.6 Ma, consistent with the Rb-Sr age (117.5 ± 1.8) Ma of pyrite from epithermal mineralization. In summary, the ore-forming process of the Tiegelongnan giant deposit can be divided into three stages: ① porphyry mineralization (123~119 Ma), ② epithermal mineralization (118~117 Ma) and ③ cover and protection of volcanic rocks (111~110 Ma).

Key words: geology, porphyry-HS epithermal, alteration, mineralization, Tiegelongnan, Tibet

西藏地区铜矿资源丰富(王勤等, 2017), 最著名的有3条铜矿带, 分别为三江成矿带、冈底斯成矿带和班公湖-怒江成矿带(Lin et al., 2017a; Tang et al., 2015)。对于班公湖-怒江成矿带而言, 90%以上的铜资源主要集中分布于多龙矿集区, 代表矿床有多不杂、波龙、铁格隆南、拿若等斑岩-浅成低温热液型铜(金、银)矿床, 主要产于羌塘地体南缘俯冲增生楔中, 是班怒洋北向俯冲过程中, 大洋板片脱水交代上覆地幔楔发生部分熔融, 形成基性岩浆并底侵下地壳, 经MASH(即Melting, Assimilation, Storage and Homogenization)作用形成中酸性岩浆, 再侵位浅部地壳形成产物(Li et al., 2013)。其中, 铁格隆南矿床

是西藏地区首个具高硫型成矿作用的斑岩成矿系统, 也是单个矿床铜资源量超过1000万吨的超大型矿床。虽然, 部分学者先后对铁格隆南矿床矿物组成(唐菊兴等, 2014)、成岩成矿年代学(方向等, 2015; Lin et al., 2017b)、成矿流体特征(杨超等, 2014)、物质来源(Lin et al., 2017a; 王艺云等, 2017)和勘查方法(唐菊兴等, 2016)等进行了初步总结, 但对矿床基本地质特征、蚀变与矿化的耦合机制(李光明等, 2015), 以及脉体类型及特征研究较为薄弱。作为斑岩-浅成低温热液矿床的典型代表, 铁格隆南矿床不仅弥补了西藏地区浅成低温热液成矿作用的空缺(唐菊兴等, 2014), 而且丰富了班怒成矿带的斑

岩成矿系统理论。本文通过对铁格隆南超大型矿床蚀变与矿化特征的精细解剖和脉体系统的全面梳理,并结合已有的成岩成矿年代学分析,建立成矿作用模型,进一步深化区域斑岩成矿系统的理论,指导班怒江成矿带乃至整个西藏地区斑岩-浅成低温热液矿床勘查和研究方向。

1 区域地质背景

多龙矿集区位于青藏高原中部,班公湖-怒江缝合带北侧,所以,其区域构造演化历史与班公湖-怒江洋的演化密切相关(图1)。

班公湖-怒江洋演化的研究最早可追溯至 20 世

纪 60 年代的科学考察,受地域和气候条件限制,一直以来研究程度较为薄弱,也存在诸多争议和未解难题。首先是班公湖-怒江洋的构造意义。潘桂棠等(1983)基于基础地质调查成果和地质、地球物理证据,认为班公湖-怒江洋是中特提斯洋的重要代表,其缝合带代表冈瓦纳大陆的北界(Yin et al., 2000)。而李才等(2006)则根据羌塘地块基底、沉积建造及构造运动等特征,认为冈瓦纳大陆的北界不是班怒缝合带而是龙木错-双湖缝合带。其次是班公湖-怒江洋的演化历史。王冠民等(2002)早期根据沉积建造特征将班怒洋的演化历史划分为早三叠世一晚三叠世初始裂谷阶段,早侏罗世原洋裂谷阶段,中-晚侏罗世残余弧后盆地阶段(曹圣华等,

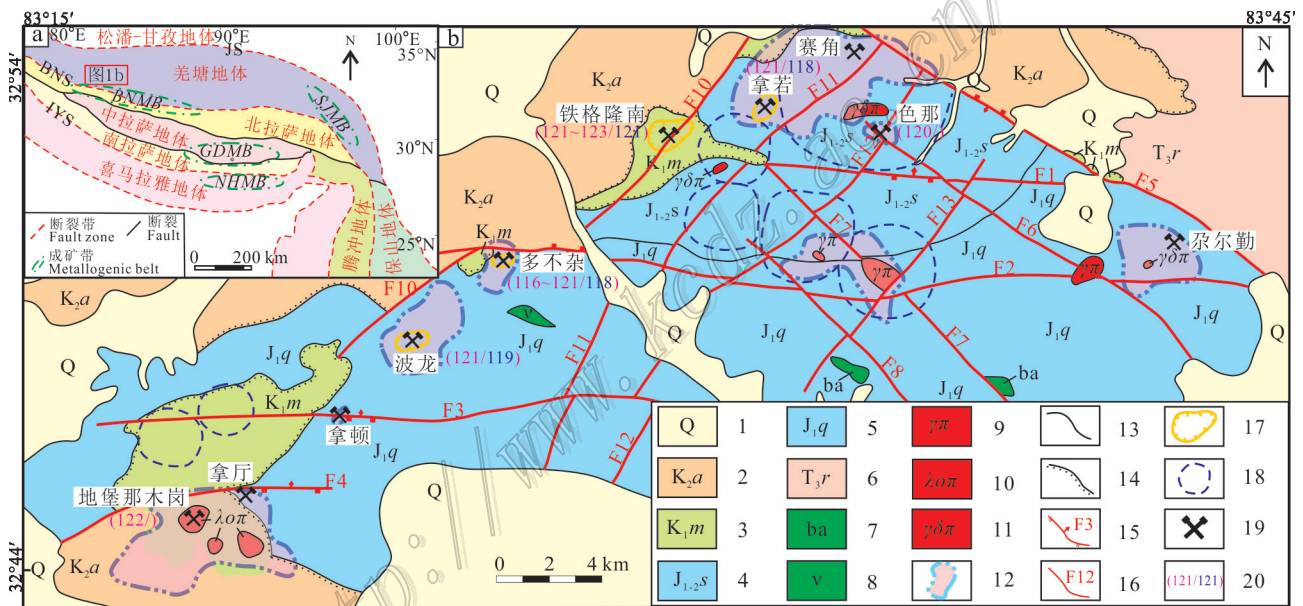


图1 多龙矿集区构造位置图(a)和区域地质图(b)(Lin et al., 2017a)

- 1—第四系;2—上白垩统阿布山组:砾岩、砂砾岩;3—下白垩统美日切错组:安山岩、英安岩;4—中下侏罗统色哇组:砂岩、粉砂岩;
- 5—中下侏罗统曲色组:砂岩、粉砂岩;6—上三叠统日干配组:灰岩;7—枕状玄武岩;8—辉长岩;9—花岗斑岩;10—石英闪长玢岩;
- 11—花岗闪长斑岩;12—蚀变区域;13—地质界线;14—不整合地质界线;15—断层及编号;16—推测断层及编号;
- 17—工程控制矿体范围;18—遥感解译环形构造;19—矿区位置;20—U-Pb/Re-Os年代学结果(Ma)
- JS—金沙江缝合带;BNS—班公湖怒江缝合带;IYS—雅鲁藏布江缝合带;SJMB—三江成矿带;
- GDMB—冈底斯成矿带;BNMB—班公湖-怒江成矿带;NHMB—北喜马拉雅成矿带

Fig. 1 Tectonic location (a) and regional geological map (b) of the Duolong ore concentration area(after Lin et al., 2017a)

- 1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous Abushan Formation: conglomerate and sand conglomerate; 3—Lower Cretaceous Meiriquecuo Formation: andesite and dacite; 4—Middle-Lower Jurassic Sewa Formation: sandstone, siltstone; 5—Middle-Lower Jurassic Quse Formation: sandstone, siltstone; 6—Upper Triassic Riganpeicuo Formation: limestone; 7—Pillow basalt; 8—Gabbro; 9—Granite porphyry; 10—Quartz diorite porphyry; 11—Granodiorite porphyry; 12—Alteration zone, 13—Geological boundary; 14—Unconformity;
- 15—Fault and its serial number; 16—Inferred fault and its serial number; 17—Controlled orebody area;
- 18—Ring structure from remote sensing; 19—Deposit location; 20—U-Pb/Re-Os dating age (Ma)
- JS—Jinsha suture; BNS—Nujiang suture; IYS—Indus-Yarlung zangbo suture; SJMB—Sanjiang metallogenetic belt; GDMB—Gangdise metallogenetic belt; BNMB—Bangong Co-Nujiang metallogenetic belt; NHMB—North Himalayan metallogenetic belt

2006)。而Metcalf(2013)和Metcalf等(2014)则综合地层学、古生物学、古地磁、岩浆-构造活动等将班怒洋在初始打开时间提前到二叠或早二叠世(300~270 Ma)。这与缝合带附近发育的基性岩脉侵位结晶时限一致(Shi et al., 2012; 林彬等, 2017), 代表了中特提斯洋的初始裂解(Xu et al., 2014; Zhai et al., 2013)。再次, 对于班公湖-怒江洋的俯冲消减过程(晚三叠世—晚侏罗世), 最大的争议莫过于俯冲极性问题, 主要有3种观点: ① 北向羌塘地体俯冲(Geng et al., 2016; Huang et al., 2017; Kapp et al., 2003); ② 南向拉萨地体俯冲(Zhu et al., 2009; 曹圣华等, 2004); ③ 南北双向俯冲(Zhu et al., 2016; 杜德道等, 2011)。此外, 班公湖-怒江洋的闭合时限也是争议的焦点, Kapp等(2003)曾根据狮泉河地区蛇绿混杂岩产出位置及区域构造样式, 认为班怒洋应闭合于晚侏罗世—早白垩世。朱弟成等(2006)则根据班公湖-怒江缝合带OIB玄武岩的岩浆活动时代(110 Ma左右), 提出班怒洋可能在晚白垩世仍未彻底消亡。曲晓明等(2013)依据缝合带内申扎-班戈地区“A”型花岗岩的识别, 推测班怒洋闭合时限应为早白垩世早期(145~130 Ma左右)。Zhu等(2016)在综合对比班怒缝合带两侧地层、岩浆岩特征后, 认为班怒洋可能是在晚侏罗世—早白垩世(140~130 Ma), 以“弧-弧”软碰撞的形式闭合。目前, 多龙地区大量早白垩世晚期(120~110 Ma)弧岩浆岩的出现(Wei et al., 2017a; 2017b), 也暗示班怒洋闭合的时限可能较晚(Fan et al., 2014; 2018)。

对于班怒成矿带西段的多龙地区, 隶属于羌南-保山地层区内的羌南地层分区, 区内及外围主要的地层单元, 由古至新依次为上石炭统展金组(C_{2z})和曲地组(C_{2q})、下二叠统龙格组(P_{1lg})、上三叠统日干配错组(T_{3r})、下侏罗统曲色组(J_{1q})和中-下侏罗统色哇组(J_{1-2s})、下白垩统美日切错组(K_{1m})和上白垩统阿布山组(K_{2a}), 以及新近系的康托组(N_{3k})。根据构造单元划分, 多龙矿集区位于羌塘-昌都陆块中的亭汞错-铁格隆被动陆缘带, 区内构造活动以断裂构造为主, 褶皱痕迹并不明显。其中, 断裂构造根据构造线方向, 可细分为3组(图1b): ① 近东西向断裂构造, F1、F2、F3、F4; ② 北西向断裂构造, F5、F6、F7、F8; ③ 北东向断裂构造, F10、F11、F12、F13。这几组断裂构造将多龙矿集区切割成“菱块状”构造格架。事实上, 受地表覆盖强, 出露露头少等因素的影响, 矿集区内构造研究较为薄弱, 但初步的构造期次分

析表明, 整体上近东西向断裂形成时间较早, 北东向断裂次之, 北西向断裂则最晚, 能切穿并破坏前二组断裂。同时, 第一组和第二组断裂则明显控制着矿集区内成岩成矿作用, 二者交汇处常为有利找矿靶区; 而第三组断裂, 则可能略晚于区域成矿作用, 甚至能破坏早期矿化体。多期的断裂活动能为岩浆上侵提供有利通道, 所以, 区内岩浆活动较为强烈, 主要以基性、中酸性、酸性岩浆活动为主, 多以岩枝、岩脉的形式侵入于侏罗系海相沉积地层中, 或以裂隙式、溢流式喷发覆盖于浅地表。出露地表或浅地表岩体常呈串珠状或带状分布, 受早期断裂构造控制作用明显, 有多期活动特征, 形成时间多为燕山期(图1b)。根据岩石类型及产状可初步划分为4类: ① 蛇绿岩残片, 主要指枕状、团块状玄武岩团块, 常呈硅质岩、或席状辉长岩墙产于侏罗世海相沉积地层中, 代表其增生楔环境; ② 基性岩脉, 主要指近东西向分布的基性辉长岩脉, 这类岩脉不同于席状岩墙, 而多以侵入体的形式侵位于侏罗系地层中, 多呈脉状、岩墙状断续分布, 结晶时代为早白垩世; ③ 中酸性-酸性侵入岩, 包括闪长岩、花岗闪长斑岩、石英二长闪长岩、花岗斑岩等, 通常蚀变较强, 部分发育明显的铜矿化, 是多龙矿集区主要的含矿斑岩, 侵位时代为早白垩世; ④ 基性-中酸性陆相火山岩, 主要指玄武质安山岩、安山岩、英安岩等喷出岩, 常沿北东向或北西向断裂分布, 是成矿后火山活动的重要产物。

多龙矿集区内主要以斑岩型铜多金属矿床为主, 部分矿床发育高硫型浅成低温热液型矿体和隐爆角砾岩型矿体, 局部还可能存在独立的金矿化(贺文等, 2017)。矿集区共包括4个大型-超大型矿床(铁格隆南、拿若、波龙、多不杂)(李玉彬等, 2012a; 2012b)、1个中型矿床(拿厅)、5个矿化点(地堡那木岗、拿顿、色那、赛角、尕尔勤)(图1b)(林彬等, 2016; 张志等, 2017)。其中, 多不杂、波龙为典型的斑岩型铜矿床, 铁格隆南为斑岩-浅成低温热液型铜矿床, 拿若为斑岩-隐爆角砾岩型铜矿床(Ding et al., 2017; 高轲等, 2016; 2017)。

2 矿区地质

铁格隆南矿区位于多龙矿集区北部, 东部与拿若矿区毗邻。矿区内出露地层简单, 由老到新, 分别为早-中侏罗世色哇组(J_{1-2s})、早白垩世美日切错组

(K_1m)、晚白垩世阿布山组(K_2a) (图 2, 唐菊兴等, 2014)。其中, 色哇组出露于矿区东部, 主要为细粒粉砂岩、砂岩, 矿物成分以长石、石英为主, 有弱绢云母化蚀变, 有少量细粒黄铁矿; 美日切错组出露于矿区中部, 主要为安山岩、安山玢岩、英安岩, 局部含少量基性岩块, 矿物成分以角闪石、斜长石、石英为主, 部分发育弱绿泥石化、碳酸盐化蚀变, 局部可见少量蓝铜矿、孔雀石化; 阿布山组少量出露于矿区西部, 主要为暗紫色、紫色中厚层状至巨厚层状细砾岩、角砾岩、砂岩; 角砾胶结多为黄褐色岩粉、发育强褐铁矿化。

矿区由于火山岩覆盖面积较大, 构造痕迹并不

明显, 主要以隐伏断裂的形式存在(图 2)。其中, F10 断裂在区域尺度上可能隐伏呈北东南西向穿过矿区, 并对矿区岩浆侵位有一定的控制作用。而矿区南侧荣那沟可能是隐伏的 F8 断裂, 对已有的矿体存在明显的破坏性(唐菊兴等, 2016)。

铁格隆南矿床岩浆活动较为发育, 但地表出露较少, 其中与成矿密切相关的次火山侵入岩, 主要为隐伏岩脉, 受深部钻孔揭露(图 2)。主要的侵入岩脉岩石类型为闪长玢岩(DP)和花岗闪长斑岩(GDP)。而成矿后的火山岩主要为安山(玢)岩(AP)或英安岩等。

其中, 闪长玢岩呈小岩脉侵位于矿区西南侧(图

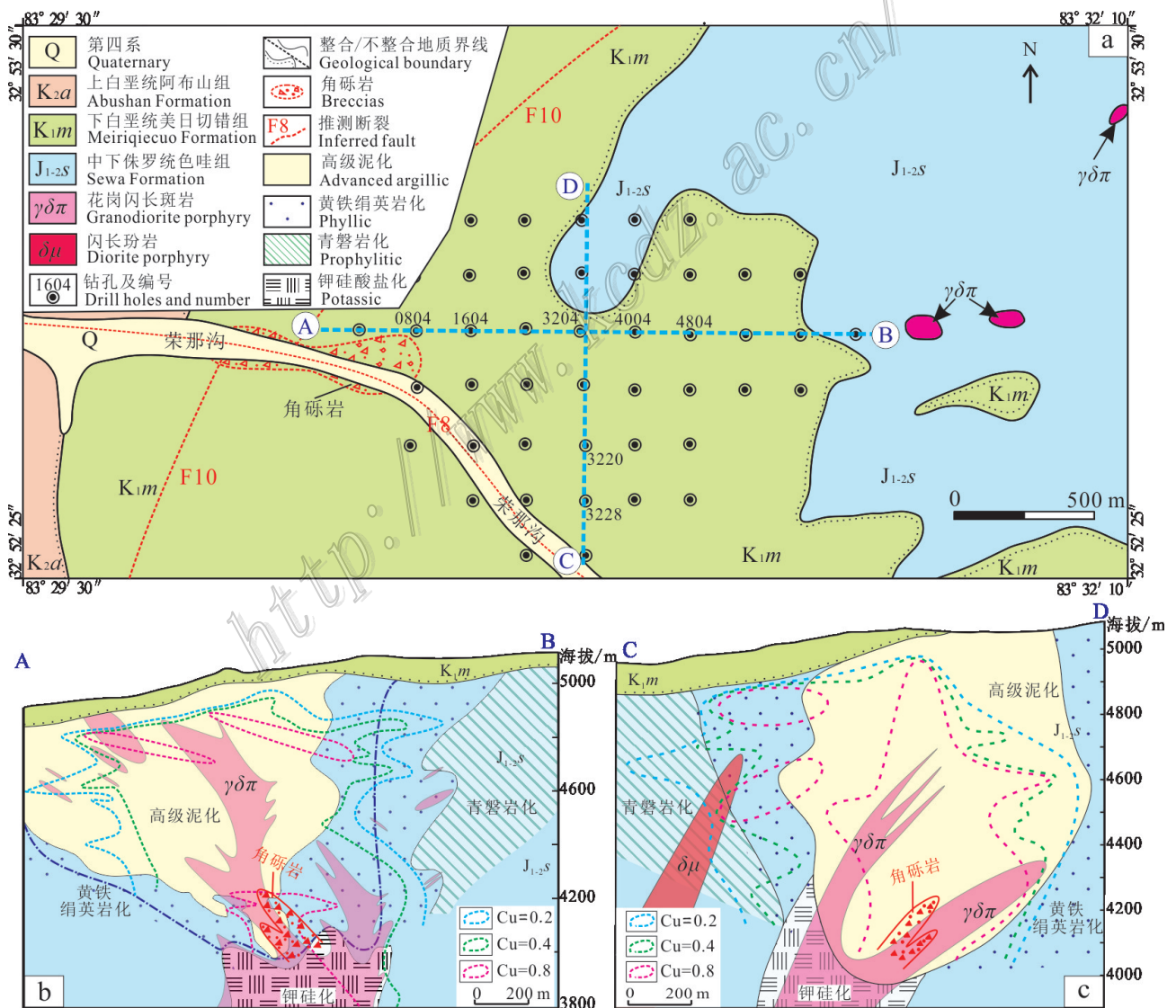


图 2 铁格隆南矿区地质图(a)及东西向(AB)(b)和南北向(CD)剖面图(c)

Fig. 2 Geological map of the Tiegelongnan deposit (a) and WE (b) section, SN (c) section

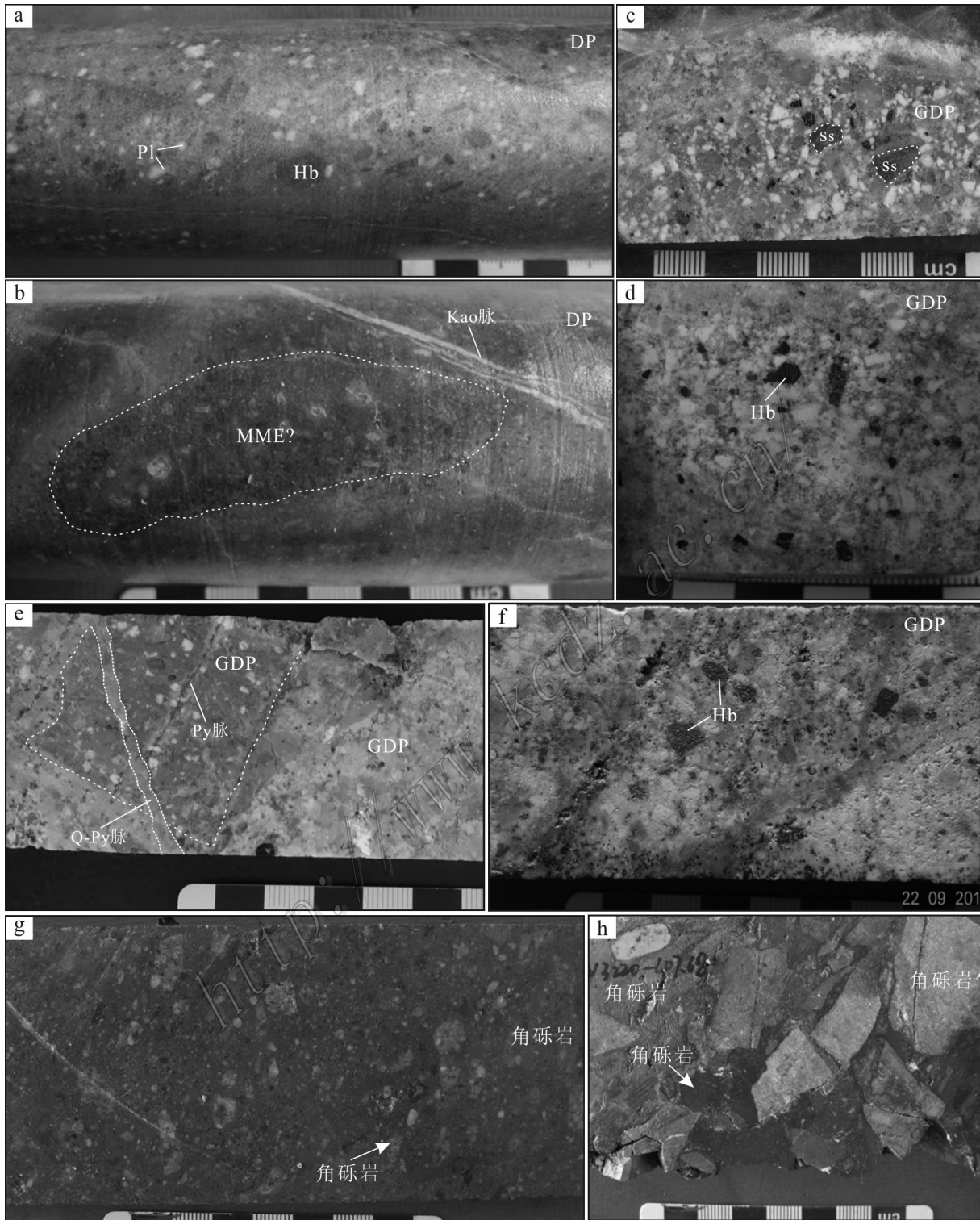


图3 铁格隆南矿床岩浆岩石学特征

a. 绿泥石、绿帘石化闪长玢岩(DP); b. 闪长玢岩中的暗色包体(MME?), 以及晚期高岭石细脉; c. 花岗闪长斑岩(GDP)与围岩接触, 捕掳少量不规则硅化黑云母化砂岩角砾; d. 花岗闪长斑岩; e. 花岗闪长斑岩胶结花岗闪长斑岩角砾, 晚期石英-硫化物脉切穿早期黄铁矿细脉; f. 花岗闪长斑岩发育较强的泥化蚀变叠加钾硅化蚀变; g. 青磐岩化含角砾安山玢岩, 角砾为强青磐岩化安山玢岩; h. 接触带构造角砾岩, 含有细粒安山岩角砾和砂岩角砾
 Ss—砂岩角砾; Hb—角闪石; Pl—斜长石; Py—黄铁矿; Q—石英; Kao—高岭石

Fig. 3 Petrology of igneous rocks in the Tiegelongnan deposit

- a. Chlorite, epidote diorite porphyry(DP); b. Mafic microgranule enclaves (MME ?) in diorite porphyry and the late kaolinite vein; c. The contact between granodiorite porphyry and wall rocks, and some small irregular sandstone breccias in the porphyry; d. Granodiorite porphyry; e. Late granodiorite porphyry cementing the early granodiorite porphyry breccia, quartz-sulfide vein cutting the early pyrite vein; f. Potassic granodiorite porphyry superimposed by the argillic alteration; g. Strong propylitic andesite breccias within the andesite porphyry; h. Fine-grained andesite breccias and sandstone breccias in the contact zone between volcanic rocks and sedimentary rocks
- Ss—Sandstone; Hb—Hornblende; Pl—Plagioclase; Py—Pyrite; Q—Quartz; Kao—Kaolinite

2)。灰白色,斑状结构,块状构造。斑晶约占 40%,主要为中酸性斜长石、角闪石,局部可见少量石英和磁铁矿,基质为闪长质(图 3a)。蚀变主要为青磐岩化蚀变,以绿泥石化、碳酸盐化、弱泥化为特征。其中,绿泥石化主要指斜长石、角闪石斑晶发生绿泥石化,局部有不规则细脉状的绿泥石、绿帘石。闪长玢岩发育弱黄铜矿化,以脉状为主,局部呈浸染状。闪长玢岩中偶见灰黑色暗色“闪长质”包体(图 3b),可能是岩浆混合的产物。花岗闪长斑岩(GDP)主要呈岩枝或岩脉,侵入于矿区中东部(ZK0804~ZK4804)(图 2,图 3),灰白色,斑状结构,块状构造;斑晶约占 30%~40%,主要为石英(30%~45%)、斜长石(30%~45%)、角闪石(5%~15%)、少量黑云母(3%~10%),基质为长英质(图 3c)。早期花岗闪长斑岩发育明显的泥化蚀变,浅部(ZK0804~ZK2404)蚀变最强,很难清晰识别其矿物组合,仅残留斑晶外形及浑圆状的石英斑晶。在中-深部(ZK4004~ZK4804),泥化蚀变中等-较弱,可清晰识别原有矿物组合。在深部(ZK4804),早期花岗闪长斑岩及其与围岩接触带附近,可见弱黑云母化和黑云母角岩化(图 3d)。浅部斑岩多发育浸染状黄铁矿、斑铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿等矿化,中-深部斑岩则多发育细脉状黄铁矿、斑铜矿、铜蓝、辉钼矿等矿化,深部斑岩及围岩接触带则发育细脉浸染状黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿、斑铜矿矿化。局部花岗闪长斑岩(钻孔 3204 深部)中可见热液角砾岩(图 3c、e),断续延伸约 50~100 m,角砾成分为砂岩和花岗闪长斑岩角砾,胶结物主要为花岗闪长斑岩及热液脉体。其中,砂岩角砾,多棱角分明,具有一定可拼性,说明未发生明显的位移(图 3e)。同时,砂岩角砾发育有明显的硅化、弱黑云母化蚀变(图 3f),花岗闪长斑岩角砾则多呈不规则状,部分角砾含有早期黄铁矿细脉,且细脉未切穿晚期花岗闪长斑岩,说明花岗闪长斑岩具有多期活动的特征。

成矿后火山岩主要为安山岩、英安岩,局部夹少量含角砾安山玢岩(图 3g),主要呈红棕色、紫红色、

斑状结构或安山结构、块状构造;斑晶主要为斜长石、角闪石和少量黑云母,基质为闪长质,发育少量方解石脉,蚀变主要为弱泥化、碳酸盐化;局部因青磐岩化而呈浅黄绿色,局部可见团斑状玉髓和石英细脉。火山岩中均未发育明显的铜金矿化,为成矿后次火山活动的产物。火山岩与砂岩地层接触带,可见一层较薄(0.4~1 m)的角砾岩带(图 3h),角砾成分以弱硅化砂岩为主,胶结物多泥质和热液,发育明显的褐铁矿化,局部可见少量的孔雀石化。推测其为赋矿砂岩地层在成矿期或成矿后,大面积火山岩覆盖前,区域隆升剥蚀的产物。

3 蚀变与矿化

铁格隆南矿床不同于简单的斑岩型铜金矿床(Sillitoe, 2010),既有斑岩型蚀变矿化特征,又受浅成低温热液成矿作用的大规模叠加。详细的地质编录和镜下鉴定揭示,铁格隆南典型的蚀变类型有钾硅化(黑云母化)、青磐岩化(绿泥石化、绿帘石化)、黄铁绢英岩化(绢云母化、弱泥化)和高级泥化(高岭石化、明矾石化、地开石化、多孔状硅化)。以下分别对各种蚀变特征进行详细介绍。

3.1 钾硅酸盐化(黑云母化)蚀变

铁格隆南矿床钾硅化与其他典型斑岩矿床不同,未见明显钾长石化,主要表现为黑云母化和硅化,是矿区较早的蚀变类型,以发育热液蚀变黑云母为主要特征,可伴生石英及少量硬石膏等矿物。其中,黑云母化和硅化主要产于矿区深部的花岗闪长斑岩体及围岩接触带中。花岗闪长斑岩体中黑云母化主要呈细粒状产出,多交代角闪石和斜长石斑晶,形成热液黑云母集合体,并残留角闪石和斜长石晶型,局部可清晰识别细粒黑云母的解理,局部伴随有团斑状赤铁矿。硅化,主要指花岗闪长斑岩中发育明显的石英细脉,脉体中见少量的黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿。同时,胶结的花岗闪长斑岩角砾也呈现一定程度的弱硅化。

铁格隆南矿床最主要的黑云母化和弱硅化蚀变体现在与深部斑岩体接触的砂岩地层中,集中表现在 ZK3204、ZK4004 和 ZK4804 深部(900~1300 m)。其中,黑云母化有 2 种表现形式:① 砂岩中原有的长英质组分受热烘烤蚀变呈灰黑色,发生弥散状、细粒黑云母化,这种黑云母肉眼很难识别,但在显微镜下清晰可见,另外,局部的不均匀团块状黑云母化,即弥散状黑云母呈团斑状产于砂岩中;② 砂岩中广泛发育热液黑云母-石英脉,这类脉体产状变化多样,脉宽变化大,多为 4~20 mm,最大可达 50 mm,其中黑云母多呈中-粗粒产于脉体中间或脉两壁,或是呈团斑状产于脉壁(图 4a)。这类热液黑云母-石英脉中可含有黄铁矿、黄铜矿、少量辉钼矿等硫化物(图 4a、b),偶见少量硬石膏。弱硅化蚀变也有 2 种表现形式:① 砂岩整体组分发生硅化,质地变更为坚硬,即角岩化;② 砂岩中发育多组石英脉体,即有石英-黄铁矿-黄铜矿±辉钼矿脉,也有纯石英脉和石英-黑云母脉。

与钾硅化蚀变密切相关的主要是黄铜矿化、斑铜矿化和辉钼矿化,矿化程度较好,铜平均品位大于 0.4%,局部钼平均品位可达 0.02%。其中,斑岩体内的黄铜矿、斑铜矿多与黄铁矿共生呈细脉状产出,而砂岩角岩中则多呈细粒浸染状产出,少量产于热液黑云母脉中。辉钼矿主要集中呈细粒状、鳞片状产于花岗闪长斑岩的石英脉中,局部可达钼的边界品位。

3.2 青磐岩化

青磐岩化主要分布在铁格隆南矿床矿区南部闪长玢岩及砂岩围岩中,由 ZK3228、ZK3236、ZK2416 等钻孔控制,整体蚀变强度中等-较弱。主要表现为闪长玢岩及色哇组围岩地层中发育广泛的绿泥石、绿帘石化,少见碳酸盐脉。其中,闪长玢岩中青磐岩化以 ZK3228 最为典型,主要有 3 种表现形式:① 绿泥石、绿帘石广泛交代角闪石或斜长石斑晶,使原有角闪石或斜长石斑晶呈灰绿色,残留其斑晶外形(图 4c);② 绿泥石呈细脉状产出或呈“晕”的形式产于黄铁矿细脉的两壁或最外侧,局部可形成绿泥石条带(图 4d);③ 绿泥石、绿帘石等交代闪长玢岩基质中闪长质组分,呈弥散状分布,使得整个岩石变成浅绿色。色哇组砂岩地层中的青磐岩化包括 ZK3228、ZK3236、ZK2436、ZK2428 等钻孔控制的南部大片区域,主要表现为砂岩中长英质组分发生明显的绿帘石化蚀变,使得整个岩石呈灰绿色。局部可见绿泥

石+黄铁矿呈环带状产于砂岩“圆斑”四周。此外,铁格隆南矿床中青磐岩化,可被绢云母化和弱泥化叠加改造,局部可见绿泥石再次蚀变为细粒的绢云母。

与青磐岩化密切相关矿化主要为黄铜矿化,矿化程度较弱,铜平均品位 0.1%~0.2%,具体的矿化形式包括:① 黄铜矿呈细粒浸染状产于色哇组砂岩地层中,断面上清晰可见,可与浸染状黄铁矿共生;② 黄铜矿与黄铁矿、赤铁矿等共生,形成黄铁矿-黄铜矿-赤铁矿脉,脉壁平直且连续性较好,产状较陡,多含有孔洞,常被后期泥化蚀变叠加,脉壁有泥质矿物;③ 黄铜矿呈独立脉状产出(或含少量赤铁矿)闪长玢岩中,脉壁不规则且连续性较差,可切穿早期黄铁矿-黄铜矿-赤铁矿脉。

3.3 黄铁绢英岩化

铁格隆南矿床黄铁绢英岩化在主要分布在矿区中部大面积区域(控制深度约 500~900 m),常叠加并改造早期的钾硅化和青磐岩化,主要表现为花岗闪长斑岩及色哇组围岩中发育广泛细粒的绢云母、石英、黄铁矿和少量黏土矿物。黄铁绢英岩化主要成弥散状形式产出,即原有的长石类矿物和长英质组分分解蚀变为细粒绢云母、高岭石、石英等矿物,局部可见晶形较好的白云母,并伴有细粒的黄铁矿、铜蓝、黄铜矿、斑铜矿化。花岗闪长斑岩中均有明显黄铁绢英岩化,详细蚀变特征如下:① 斑岩中的长石斑晶全部发生分解,形成细粒绢云母和高岭石,原长石斑晶晶形隐约可见或变得不规则(图 4e、f);部分角闪石斑晶和黑云母斑晶也发生明显的绢云母化,残留其斑晶外形;原石英斑晶发生明显的溶蚀现象,呈港湾状(图 4f);② 斑岩基质中的长石组普遍发生绢云母化,可见大量微细粒次生石英颗粒,同时伴随细粒浸染状黄铁矿。色哇组砂岩中黄铁绢英岩化主要表现为砂岩中隐晶质的长石均发生具有丝绢光泽的绢云母化,其粒度较细,肉眼无法识别,但显微镜下清晰可见。这类黄铁绢英岩化主要成弥散状产出,伴有良好的浸染状黄铁矿、黄铜矿化。

与黄铁绢英岩化密切相关的矿化主要为细粒浸染状黄铁矿、铜蓝、黄铜矿、斑铜矿化和少量石英-硫化物脉。铜平均矿化品位大于 0.4%。其中,早期黄铁矿和黄铜矿常被后期他形铜蓝、斑铜矿等矿物交代,完全交代的铜蓝、斑铜矿可残留黄铁矿晶形,形成骸晶结构,不完全交代则形成交代残余结构,局部可形成斑铜矿和黄铜矿的固溶体分离结构。在石英-硫化物脉中也可见黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿以及少

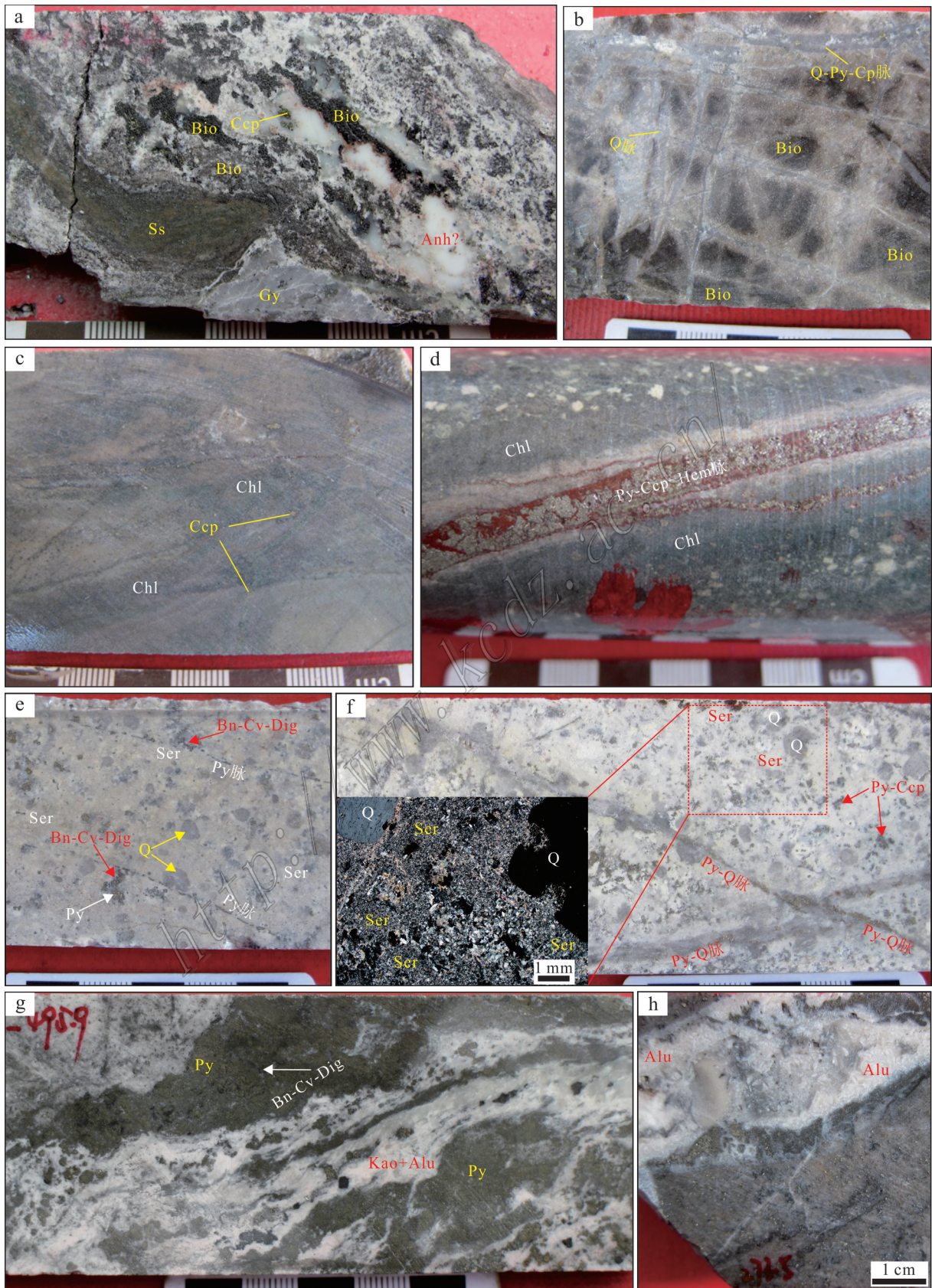


图 4 铁格隆南矿床蚀变特征

- a. 黑云母化角岩中发育热液黑云母-硬石膏-黄铜矿宽脉; b. 黑云母化角岩中发育多组石英细脉, 并被后期石英-黄铁矿-黄铜矿脉穿切;
 c. 弱青磐岩化砂岩中产出不规则绿泥石化化和浸染状黄铜矿和黄铁矿矿化; d. 青磐岩化闪长玢岩中黄铁矿-黄铜矿-赤铁矿脉, 发育绢英岩化蚀变晕, 最外侧发育绿泥石化晕; e. 黄铁绢英岩化花岗闪长斑岩, 发育细脉浸染状黄铁矿、斑铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿等矿化; f. 花岗闪长斑岩发强黄铁绢英岩化, 石英斑晶呈溶蚀港湾状, 发育多期石英-黄铁矿脉;
 g. 高岭石-明矾石脉穿切并改造早期黄铁矿脉; h. 砂岩中皮壳状明矾石-黄铁矿脉
 Alu—明矾石; Anh—硬石膏; Bio—黑云母; Bn—斑铜矿; Ccp—黄铜矿; Cv—铜蓝; Dig—蓝辉铜矿;
 Eng—硫砷铜矿; Hem—赤铁矿; Kao—高岭石; Mol—辉钼矿; Py—黄铁矿; Q—石英

Fig. 4 Alterations in the Tiegelongnan deposit

- a. Biotite-anhydrite?-chalcopyrite vein in biotite hornfels; b. Different stages of quartz veins cut by the late quartz-pyrite-chalcopyrite vein in biotite hornfels; c. Irregular chlorite and disseminated chalcopyrite and pyrite in the propylitic sandstone; d. Pyrite-chalcopyrite-hematite vein with later phyllic halo and chlorite halo in the outer part in the propylitic diorite porphyry; e. Veinlet-disseminated pyrite, bornite, covellite, digenite in the phyllic alteration; f. Quartz-pyrite vein and corrosion quartz phenocryst in the phyllic granodiorite porphyry; g. Kaolinite-alunite vein cutting the pyrite vein in sandstone; h. Crusty alunite-pyrite vein in sandstone
 Alu—Alunite; Anh—Anhydrite; Bio—Biotite; Bn—Bornite; Ccp—Chalcopyrite; Cv—Covellite; Dig—Digenite;
 Eng—Enargite; Hem—Hematite; Kao—Kaolinite; Mol—Molybdenite; Py—Pyrite; Q—Quartz

量辉钼矿等矿化现象。这类脉体通常脉壁较平直, 且连续性较好, 属于B型脉的代表, 且部分脉体中间或者脉壁会有少量的高岭石等黏土矿物, 可能是高级泥化蚀变作用叠加的产物(图4f)。

3.4 高级泥化

高级泥化是铁格隆南矿床最重要的特征, 也是其区别波龙、多不杂等典型斑岩Cu(Au)矿床的最重要标志。铁格隆南矿床中浅部发育的高级泥化(深度0~500 m), 主要表现为花岗闪长斑岩的顶部及其围岩发育大面积的高岭石、地开石、明矾石化, 靠近地表则发育多孔状石英。

其中, 高岭石化是高级泥化蚀变最广泛的代表, 主要体现为: ① 花岗闪长斑岩顶部长石斑晶及长英质基质, 发育强高岭石化蚀变, 长石斑晶外形几乎不可见, 部分蚀变高岭石被热液流体淋滤掉, 形成残留空洞; ② 与花岗闪长斑岩顶部接触的色哇组砂岩也发育强高岭石化蚀变, 即长英质组分已全部高岭石化, 形成弥散状白色斑点, 且部分被淋滤形成细小空洞; ③ 花岗闪长斑岩及砂岩围岩中, 多处可见的高岭石脉(大于10 mm), 脉状可包含早期矿化角砾, 局部裂隙中甚至可见多面体高岭石晶体。另外, 高岭石化也可沿脉体或裂隙向深部延伸, 导致中深部很多早期脉体和裂隙的两壁或者中间空隙发育细粒乳白色的高岭石化, 实现对早期蚀变和矿化的叠加和改造(图4g)。

铁格隆南矿床明矾石化有2类产出特征, 一类呈弥散状或脉状产于色哇组砂岩中, 多为灰白色、浅肉红色, 部分为白色, 伴良好的铜矿化; 另一类呈脉状产于花岗闪长斑岩及砂岩围岩中, 此类明矾石晶

形较好, 呈细粒状、皮壳状产于脉中, 伴随较好的铜矿化(图4h)。整个成矿作用过程中, 明矾石呈现多期活动, 早期明矾石可以被晚期的高岭石或明矾石脉体穿切。另外, 明矾石镜下特征显示, 明矾石的干涉色较高, 多呈二级蓝-二级红, 少量呈一级灰白-黄, 晶形较好, 多呈菱块状、长板状, 常可见清晰明暗生长环带。

地开石化规模相对较小, 主要呈灰白色脉状、细脉状产于花岗闪长斑岩及砂岩地层中, 或呈细粒弥散状产出, 局部可见少量不规则团斑状地开石化。多孔状硅化则主要产于近地表区域(0~50 m), 主要表现为花岗闪长斑岩或色哇组砂岩, 因浅地表强酸性流体的淋滤和溶蚀作用, 使得其长石、角闪石等易分解组分全部淋滤消失, 形成大小不一的空洞, 残留抗酸性的石英, 从而形成多孔状硅质岩石。

铁格隆南矿床高级泥化蚀变通常与高品位铜金矿化密切相关, 铜平均矿化品位大于0.4%, 局部可达0.8%~1.0%, 尤其是高岭石和明矾石化多伴有细脉-浸染状的黄铁矿、硫砷铜矿、铜蓝、斑铜矿、黄铜矿、蓝辉铜矿、少量的辉钼矿等矿化。这些铜-硫体系矿物既可以交代早阶段浸染状黄铁矿或黄铜矿, 也可与石英-高岭石-明矾石等矿物一起呈独立脉状产出。

根据上述不同蚀变带特征, 结合Terra Spec及高光谱蚀变分析, 铁格隆南矿床详细的蚀变分带如图2。以黑云母化为主的弱钾硅化蚀变主要位于矿区深部(ZK3204~ZK4804), 其对应的金属矿化主要为细脉浸染状黄铜矿、黄铁矿及少量斑铜矿和辉钼矿, 铜平均品位大于0.4%, 局部铜矿化大于0.8%。而青

磐岩化主要分布于矿区外侧(南侧及东侧),整体蚀变程度较弱,蚀变矿物主要为绿泥石,含少量的绿帘石。矿化也较弱,主要为少量的细脉、浸染状的黄铁矿、黄铜矿及斑铜矿,铜矿化平均品位多小于0.2%。黄铁绢英岩化位于矿区中部,规模较大,程度强,广泛叠加改造早期钾硅化和青磐岩化,对应的金属矿化主要为细脉、浸染状的黄铁矿、黄铜矿、铜蓝、斑铜矿及少量辉钼矿。与钾硅化及青磐岩化相比,黄铁绢英岩化带中铜蓝含量明显升高,铜的矿化稳定,平均品位多大于0.4%。高级泥化蚀变主要分布于矿区中浅部(ZK0804-ZK3204),蚀变主要为明矾石、高岭石、地开石的矿物组合,局部含有少量的叶腊石、水铝石。金属矿化较强,主要为浸染状、脉状黄铁矿、硫砷铜矿、铜蓝、斑铜矿、蓝辉铜矿、砷黝铜矿、久辉铜矿等,局部有少量的辉钼矿、方铅矿和闪锌矿。铜矿化平均品位大于0.4%,局部大于0.8%。

此外,在矿区安山岩覆盖层之下,原古地表范围(深度0~10 m)发育大量次生裂隙,裂隙中发育网脉状褐铁矿化、赤铁矿化和少量孔雀石化。说明受区域隆升剥蚀的影响,铁格隆南矿床在经历钾硅化、青磐岩化、黄铁绢英岩化和高级泥化蚀变之后,浅地表区域曾经经历了小规模的次生淋滤作用。当古地表水与含矿地层和岩体接触,一定程度的淋滤其中的铜、金矿化元素,并将其氧化运移到深部或地势低洼的地区,形成区域的水系沉积物异常,这也是多龙矿集区最重要的找矿线索。

4 脉体系统

对于大型-超大型斑岩铜矿,通常会发育大规模的裂隙系统,而这些裂隙常被热液矿物充填形成脉体(林彬等,2012),这些脉体系统不仅与蚀变作用密切相关,也明显控制着矿化强度(杨志明等,2008;杨毅等,2015;张志等,2014)。

Gustafson等(1975)最早对智利的EI Salvador斑岩铜矿的脉体进行系统性研究,并根据不同脉体类型特征,创造性的提出与成矿热液演化过程密切相关的A、B、D脉。其中,A脉主要指成矿早期、斑岩尚未完全固结时所形成的石英±钾长石±硬石膏±硫化物细脉。这类脉体,石英呈细粒状,不对称分布,脉两侧多具有钾长石蚀变晕,脉宽1~25 mm,连续性差,可发育浸染状黄铜矿、斑铜矿和少量辉钼矿矿化。B脉则主要指含矿斑岩固结后,在大规模裂隙

事件发育时所形成的石英±硬石膏-硫化物脉,脉体无钾长石,脉壁平直,石英较粗粒,对称分布,硫化物多产于脉中心,脉两侧无明显蚀变晕,但局部可见褪色晕。常切穿A脉,脉宽5~50 mm,且连续性较好,可延伸几米。脉中硫化物多为辉钼矿、黄铜矿等。D脉则主要指成矿晚期,有天水大量加入成矿流体后形成的硫化物±硬石膏脉,脉中可含少量石英、碳酸盐,这类脉体发育黄铁绢英岩化蚀变晕,脉状硫化物主要为黄铁矿,可见少量黄铜矿、斑铜矿、硫砷铜矿、方铅矿、闪锌矿等。脉宽1~75 mm,连续性好,常延伸至几米,甚至十几米。该类脉体明显切穿早期A、B脉。后补充的C脉主要指暗色含硫化物和石膏的云母脉,这类脉体可以有碱性长石、绿色绢云母、黑云母、绿泥石等蚀变晕,常切穿A、B脉,但早于D脉,硫化物主要为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿以及极少量辉钼矿、磁铁矿(Gustafson et al., 1995)。

根据Gustafson等(1975;1995)脉体划分原则及类型,结合铁格隆南矿床的实际地质特征,本文对铁格隆南矿床脉体类型进行系统总结,初步划分为5种脉体类型,既包括前人定义的A脉、B脉、D脉,也涵盖新增的N脉和L脉。由于脉体的产出特征与矿区的矿化和蚀变有密切的联系,不同的蚀变带能形成不同的脉体类型,产出不同的矿化。所以,为清晰阐释铁格隆南矿床中脉体与蚀变、矿化之间的关系,本文将不同蚀变带中的脉体类型及特征进行单独表述,详情如下。

4.1 钾硅化带

主要产于矿区深部的斑岩体及其围岩附近,其脉体类型主要以B脉为主,含少量A脉(图5a、b),详细情况如下:

A脉体宽度较窄,约0.5~2.5 mm,脉壁多不规则,连续性较差,延伸多小于20 cm,部分可延伸至50 cm。矿化弱,主要为细粒黄铁矿、黄铜矿化及少量辉钼矿化,部分脉体不含矿化。主要的脉体类型有黄铁矿±黑云母细脉、无矿石英细脉、石英-黄铁矿±黄铜矿脉、石英±硬石膏-辉钼矿脉、石英-黑云母细脉(图5a)。其中,黄铁矿±黑云母细脉主要见于花岗闪长斑岩(ZK4804)深部,呈不规则细脉状产出,脉宽约1 mm,延伸约8~15 cm,连续性差,脉中含细粒黄铁矿和断续分布的黑云母,不含石英,且黑云母多被后期蚀变为绿泥石或绿帘石。无矿石英细脉或石英-硫化物脉中,石英呈细粒状,不对称分布,两侧常含有白色的“钠化边”。与EI Salvador斑岩型矿床

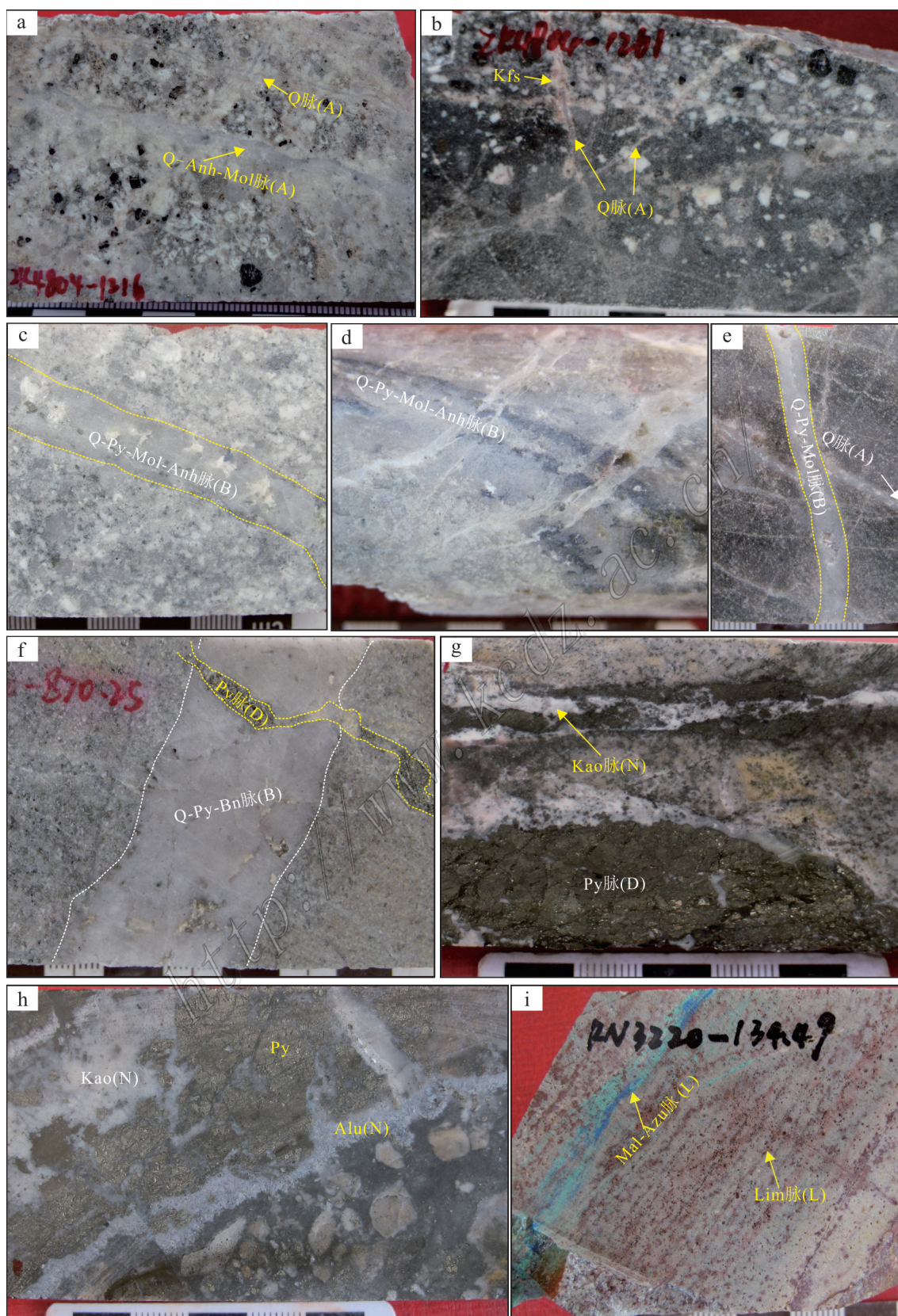


图5 铁格隆南矿床中脉体特征

a. 花岗闪长斑岩中无矿石英细脉及石英-硬石膏-辉钼矿脉; b. 花岗闪长斑岩与角岩化砂岩接触带中石英细脉, 脉体两侧有钾长石蚀变晕;

c. 花岗闪长斑岩石英-黄铁矿-辉钼矿-硬石膏脉;d. 蚀变花岗闪长岩中石英-黄铁矿-辉钼矿-硬石膏脉;e. 硅化角岩中早期无矿石英脉(A脉)被晚期石英-黄铁矿-辉钼矿脉穿切;f. 砂岩中黄铁矿-石英脉(D脉)穿切石英-黄铁矿-斑铜矿宽脉(B脉);g. 砂岩中黄铁矿脉(D脉)及后期高岭石脉(N脉);h. 砂岩中明矾石-高岭石-黄铁矿脉;i. 砂岩中发育褐铁矿细脉及孔雀石、蓝铜矿脉
Alu—明矾石;Anh—硬石膏;Azu—蓝铜矿;Bio—黑云母;Bn—斑铜矿;Ccp—黄铜矿;Mal—孔雀石;
Mol—辉钼矿;Kao—高岭石;Kfs—钾长石;Lim—褐铁矿;Py—黄铁矿;Q—石英

Fig. 5 Vein features in the Tiegelongnan deposit

a. Barren quartz vein and quartz-anhydrite-molybdenite vein in granodiorite porphyry; b. Quartz vein in the contact between granodiorite porphyry and hornfel sandstone; c. Quartz-pyrite-molybdenite-anhydrite vein in the granodiorite porphyry; d. Quartz-pyrite-molybdenite-anhydrite vein in the granodiorite porphyry; e. Barren quartz vein (A vein) cut by the quartz-pyrite-molybdenite-anhydrite vein in the sandstone; f. Pyrite vein (D vein) with minor quartz cutting the quartz-pyrite-bornite vein (B vein) in the sandstone; g. Pyrite vein (D vein) reformed by the kaolinite vein (N vein); h. Alunite-kaolinite-pyrite vein in the sandstone; i. Malachite-azurite vein and limonite veins in the sandstone
Alu—Alunite; Anh—Anhydrite; Azu—Azurite; Bio—Biotite; Bn—Bornite; Ccp—Chalcopyrite; Mal—Malachite;
Mol—Molybdenite; Kao—Kaolinite; Kfs—K-feldspar; Lim—Limonite; Py—Pyrite; Q—Quartz

不同的是,铁格隆南矿床钾硅化蚀变带中少见钾长石脉,且脉体两侧偶见钾长石蚀变晕(图5b)。

B脉体宽度较宽,约4~50 mm,脉壁多平直,连续性较好,延伸可达几十厘米或几米。脉两侧无明显蚀变晕,脉体中石英含量较高,占50%~80%;多含有硬石膏,约8%~15%;矿化中等,主要为细粒的黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿化、斑铜矿。主要的脉体类型有石英-硬石膏-辉钼矿脉、石英±硬石膏-黄铁矿脉、石英±硬石膏-黄铁矿-黄铜矿±斑铜矿脉±辉钼矿脉(图5c~e)。其中,石英-硬石膏-辉钼矿脉,主要产于早期花岗闪长斑岩深部(ZK4804),产状较陡立,石英含量约80%~85%,呈粗粒状产出,脉宽多4~10 mm,硬石膏则多呈不规则状产于石英脉中间或脉两壁,可与辉钼矿相伴产出。石英±硬石膏-黄铁矿脉最为发育,黄铁矿多呈粒状集合体分布在脉体两壁或呈中心线状产于脉体中间,硬石膏也多呈不规则状产于脉体中间或两壁。石英±硬石膏-黄铁矿-黄铜矿±斑铜矿脉主要产于与斑岩体接触的围岩(硅化黑云母角岩)中,黄铜矿和斑铜矿含量较少,多呈细粒浸染状产于脉中,局部可见少量的辉钼矿,呈粒状集合体产出。

4.2 青磐岩化带

主要产于矿区南部的闪长玢岩及其围岩附近(ZK3228~ZK3236),脉体主要为D脉,这类脉体几乎全为硫化物脉,偶见少量石英,基本不含硬石膏,有黄铁绢英岩化或褪色蚀变晕。硫化物以黄铁矿、赤铁矿为主,含有少量的黄铜矿。脉体主要类型为黄铁矿细脉、黄铁矿-赤铁矿±黄铜矿脉(图5d)、黄铜矿-赤铁矿细脉。

黄铁矿细脉 脉宽多为2~5 mm,脉壁较平直,延

伸多>20 cm,脉两侧发育灰绿色绿泥石蚀变晕,形成时间较早(图5f)。

黄铁矿±黄铜矿-赤铁矿脉 脉体硫化物主要为黄铁矿(50%~90%)和赤铁矿(20%~40%),其中,黄铁矿多呈细粒状产于脉中间,少量细粒他形黄铜矿与黄铁矿呈紧密共生,赤铁矿则多产于脉两壁或脉体空隙间。脉体中偶见少量的粗粒石英。脉体宽度约5~30 mm,脉壁平直,连续性较好,可延伸几米。脉体两侧可见2层蚀变带,靠近脉壁侧发育灰白色绢英岩化蚀变晕或浅灰色硅化蚀变晕,远离脉壁侧则发育灰绿色绿泥石蚀变晕。该类脉体可切穿早期黄铁矿细脉,又可被黄铜矿-赤铁矿细脉切穿。

黄铜矿-赤铁矿脉 脉体硫化物主要为细粒他形黄铜矿(60%~80%),脉壁为细粒赤铁矿(5%~15%),偶见少量黄铁矿(5%~10%)。脉体宽度约3~6 mm,脉壁不规则,连续性较差,延伸度<30 cm。

此外,局部偶见1~2条磁铁矿细脉,无石英、硬石膏等,脉体宽约1~2 mm,连续性差,延伸长约30 cm。脉体两侧无明显蚀变晕。

4.3 黄铁绢英岩化带

分布范围较广,主要产于高级泥化蚀变与早期蚀变之间的斑岩体及围岩中,对钾硅化蚀变和青磐岩化有明显的叠加改造现象。发育的脉体类型主要为B脉和D脉(图5d~f)。

B脉脉体宽度较宽,约4~40 mm,甚至超过100 mm,脉壁多平直,连续性较好,延伸可达几十厘米或几米。脉两侧无明显蚀变晕,脉体中石英含量较高,占50%~80%,局部含有硬石膏(容易水化为石膏);矿化中等,主要为细粒的黄铁矿、局部可见少量黄铜矿和辉钼矿化。主要的脉体类型有石英-辉钼矿脉、

石英±硬石膏-黄铁矿±辉钼矿脉(图5d)。石英-辉钼矿脉和主要产于早期花岗闪长斑岩中深部(ZK4804),产状较陡立,石英含量约80%~85%,呈粗粒状产出,脉宽多4~12 mm,辉钼矿主要成粗粒状或鳞片状产于脉体两壁。石英±硬石膏-黄铁矿±辉钼矿脉,主要产于与斑岩体接触的围岩中,其中,黄铁矿多呈细粒集合体分布在脉体两壁或呈中心线状产于脉体中间,部分含细粒辉钼矿呈浸染状产于脉体中,偶见少量硬石膏呈粒状集合体产于脉体中。脉体中石英含量较高,约占60%以上,石英从脉壁向中间生长,形成梳状结构,部分脉体中间形成孔洞或晶洞。脉体常受后期酸性流体叠加改造,在空隙或中间裂隙中形成乳白色高岭石等泥质矿物。

D脉主要为黄铁矿脉,脉体中几乎全为黄铁矿,局部可见少量赤铁矿,偶见少量石英和石膏(可能为硬石膏水化产物)。脉体宽度约6~15 mm,边界平直,连续性好,常可延伸30 cm及以上。脉体两侧常有绢英岩化蚀变晕,局部可见弱硅化晕。部分脉体中也可见少量后期高级泥化蚀变叠加的乳白色高岭石(图5g)。

4.4 高级泥化带

与El Salvador矿床不同的是,铁格隆南矿床发育大范围强烈的高级泥化蚀变,主要产于矿区中心斑岩体及其围岩中。高级泥化蚀变不仅对早期的钾硅化、黄铁绢英岩化等蚀变有明显的叠加改造现象,同时,也发育大量含泥质矿物的矿化脉体和浅部的褐铁矿化脉体,分别将其定义为N脉和L脉(图5h、i)。

N脉泛指所有高级泥化蚀变带中含泥质矿物或明矾石的脉体,脉体中明显含有高岭石、地开石等泥质矿物和/或明矾石等硫酸盐矿物,石英含量较少,基本不含硬石膏。脉体多较宽(多大于10 mm),脉体边界也较为平直,连续性较好。矿化十分发育,以黄铁矿为主,同时发育斑铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿、硫砷铜矿等多种铜硫体系矿物。脉两侧无明显蚀变晕,说明其热液流体温度相对较低。主要的类型为高岭石±明矾石±地开石-硫化物脉、明矾石-硫化物脉、地开石±硫化物脉(图5g-h)。

高岭石-地开石±明矾石-硫化物脉 在高级泥化蚀变带最为发育,占脉体总数的70%以上,脉体宽度变化大,为3~50 mm,甚至大于80 mm,脉壁多不规则,连续性较好,延伸可达数米。脉体中主要发育乳白色高岭石,部分高岭石因含杂质(铁质)而成红

棕色,局部高岭石脉状可见“同心环”,在空洞较大处也可结晶形成多边形高岭石晶体。地开石主要成浅灰绿色或浅蓝色,多与高岭石紧密共生。部分脉体也可见明矾石,多呈乳白色皮壳状产出(图5g)。脉体中硫化物较为发育,以粒状黄铁矿为主,部分含硫砷铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、斑铜矿等铜硫体系矿物,局部偶见细粒辉钼矿产于脉体两壁,此外,局部偶见少量方铅矿、闪锌矿产于此类脉体中。部分脉体中黄铁矿呈硫化物集合体角砾被胶结,可能是N脉对早期脉体裂隙破坏后,胶结早期脉体中硫化物形成。部分脉体中深灰色黄铁矿可呈针状、长柱状。

明矾石-硫化物脉 脉体宽度约20~50 mm,脉体边界多不规则,连续性较好,延伸可达几十厘米,甚至几米。脉体中发育明矾石,根据其杂质成分的不同,包括乳白色和浅肉红色2种。其中,乳白色明矾石则多呈皮壳状产出,部分对称分布。而浅肉红色明矾石则多呈脉状或不规则粒状分布。脉体中矿化较发育,主要为黄铁矿和硫砷铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、斑铜矿等铜硫体系矿物。部分黄铁矿等硫化物也可呈角砾状产于脉状(图5h)。

地开石细脉 脉体宽度较窄,多小于5 mm,脉体边界平直,连续性较好,延伸多30~50 cm。脉体中地开石多呈浅灰色细粒状产出。脉体中硫化物含量较低,或基本无硫化物。这类脉体常切穿早期B脉。

表生淋滤带 指浅地表砂岩或安山岩中发育少量褐铁矿化脉,即L型脉体(图5i)。这类脉体靠近地表,是早期黄铁矿细脉氧化后的产物,部分脉体中可含有少量孔雀石化、蓝铜矿化。脉体宽度多为1~3 mm,脉体边界多不规则,连续性较差,延伸多小于40 mm。

根据上述脉体穿切关系(图6h~i)以及蚀变和矿化分带特征,铁格隆南矿区的成岩成矿作用,从早到晚,可初步划分为4期,即岩浆期(I)、岩浆-热液期(II)、浅成低温热液期(III)和表生期(IV)。详细成岩成矿作用期次见图7。

其中,岩浆期(I)主要指深部岩浆热液侵位后,冷凝固结的过程。岩浆-热液期(II)主要指以岩浆热液为主的成矿流体在斑岩体及其围岩中,以细脉-浸染状形式发生黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、辉钼矿等矿化的过程(图7),同时还形成了钾硅化、青磐岩化蚀变、黄铁绢英岩化等蚀变(图7)。该成矿期又可根据脉体穿切关系,再细分为:① II-1 辉钼矿-黄

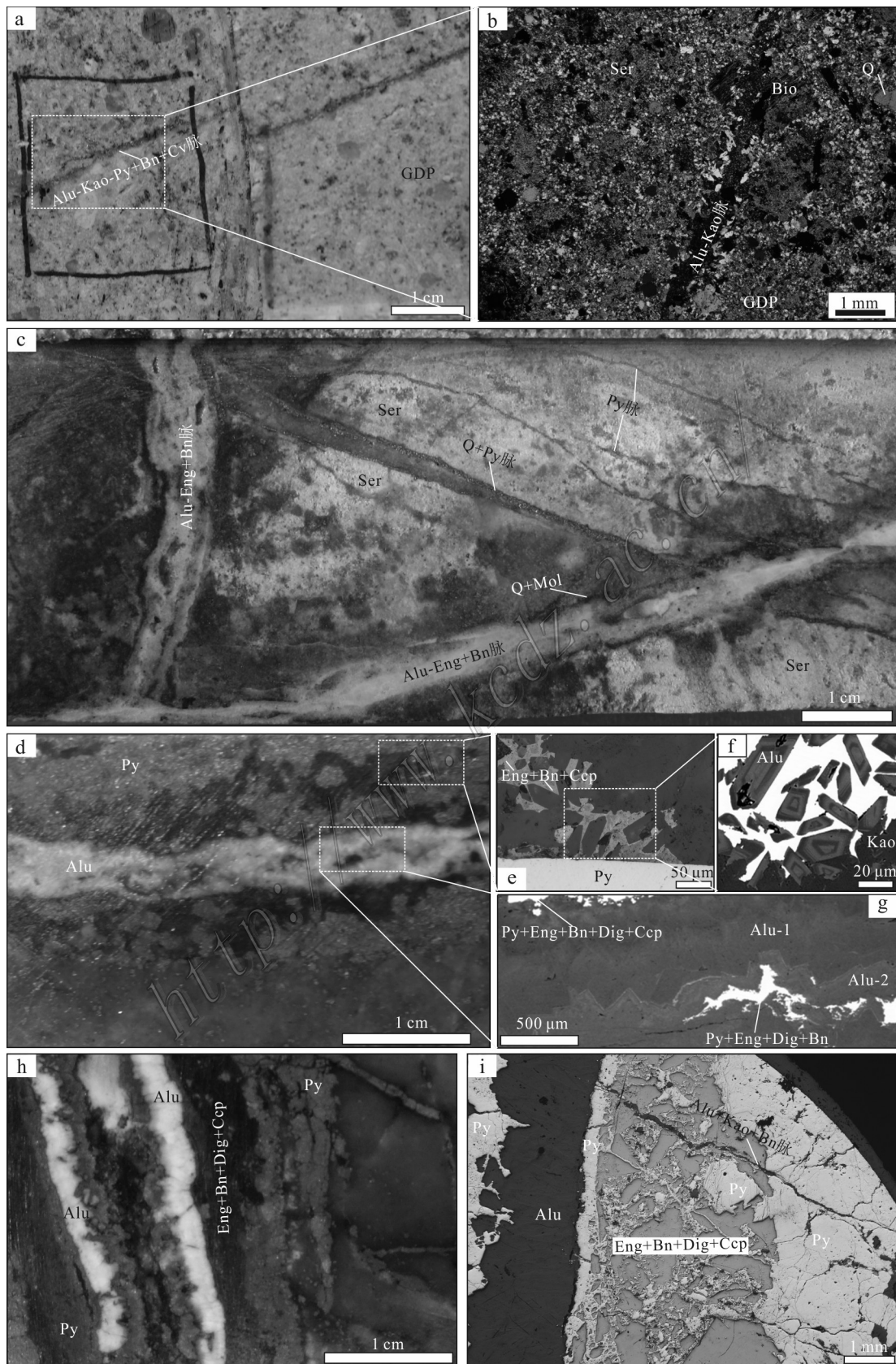


图 6 铁格隆南矿床重要蚀变-矿化现象

a. 花岗闪长斑岩中,发育强黄铁绢英岩化,长石斑晶及黑云母斑晶蚀变为绢云母+细粒石英,后被高岭石-明矾石-黄铁矿-黄铜矿-斑铜矿-铜蓝细脉穿切;b. 强黄铁绢英岩化斑岩被高岭石-明矾石细脉穿切(正交偏光);c. 黄铁绢英岩化砂岩中,早期石英-黄铁矿脉或黄铁矿细脉被多期次的明矾石-硫砷铜矿-斑铜矿脉穿切,部分脉体两侧有细粒的石英-辉钼矿;d. 黄铁矿-硫砷铜矿-斑铜矿-蓝辉铜矿-黄铜矿脉被明矾石-硫化物脉穿切;e. 硫砷铜矿-斑铜矿-黄铜矿呈他形晶产于早期自形明矾石粒间;f. 自形环带状明矾石及高岭石(扫描电镜);g. 早期粗粒自形明矾石-硫砷铜矿-黄铁矿脉中间充填晚期细粒明矾石-黄铁矿-硫砷铜矿-蓝辉铜矿-斑铜矿(扫描电镜);h. 早期自形明矾石与黄铁矿-硫砷铜矿-斑铜矿-蓝辉铜矿-黄铜矿脉;i. 早期明矾石-硫化物脉中出现细微裂隙,并被晚期高岭石-明矾石-斑铜矿充填
Py—黄铁矿;Eng—硫砷铜矿;Mol—辉钼矿;Ccp—黄铜矿;Bn—斑铜矿;Dig—蓝辉铜矿;Alu—明矾石;Kao—高岭石;
Ser—绢云母;Bio—黑云母;Q—石英;GDP—花岗闪长斑岩

Fig. 6 Important alterations and mineralizations in the Tiegelongnan deposit

a. Plagioclase and biotite phenocryst altered into fine-grain sericite and quartz, then cut by the kaolinite-alunite- pyrite- chalcopyrite- bornite-covellite vein in granodiorite porphyry; b. Kaolinite-alunite vein in phyllic alteration zone of sandstone (crossed nicols); c. Early pyrite vein and quartz-pyrite vein cut by the multi-stage alunite-enargite-bornite vein, with fine-grain quartz and molybdenite on the margin in phyllic sandstone; d. Pyrite-enargite-bornite-chalcopyrite-digenite vein cut by the alunite-sulfide vein; e. Enargite-bornite-chalcopyrite in the intergranular space of alunite, with anhedral texture; f. Kaolinite and concentric zone alunite in scanning electron microscope (SEM); g. Coarse-grained alunite-enargite-pyrite vein filled with fine-grained alunite-pyrite-enargite-digenite- bornite vein (SEM); h. Pyrite-enargite- bornite-digenite-chalcopyrite vein; i. Fissures of alunite-sulfide vein filled with kaolinite-alunite-bornite vein
Py—Pyrite; Eng—Enargite; Mol—Molybdenite; Ccp—Chalcopyrite; Bn—Bornite; Dig—Digenite; Alu—Alunite;
Kao—Kaolinite; Ser—Sericite; Bio—Biotite; Q—Quartz; GDP—Granodiorite porphyry

铜矿-黄铁矿阶段,有明显钾硅化蚀变,后期常被黄铁绢英岩化或弱泥化蚀变叠加,矿化主要为细脉-浸染状黄铜矿和石英-辉钼矿细脉,局部有少量斑铜矿,脉体类型以A脉为主,有少量B脉;② II-2 黄铜矿-黄铁矿-铜蓝-斑铜矿-辉钼矿(赤铁矿)阶段,蚀变主要为青磐岩化和黄铁绢英岩化,其中,黄铁绢英岩化多叠加改造早期青磐岩化和钾硅化,如原热液黑云母再发生绢云母化(图6a、b),矿化主要为浸染状黄铁矿-黄铜矿-铜蓝以及石英-黄铁矿脉,石英-黄铁矿-黄铜矿-斑铜矿脉、石英-黄铁矿-黄铜矿-辉钼矿脉和黄铁矿-黄铜矿-赤铁矿脉等。脉体类型以B脉、D脉为主,局部有少量的A脉。

浅成低温热液期(Ⅲ)主要指在原斑岩蚀变和矿化作用的基础上,当岩浆气液与大气水混合形成的酸性(或偏酸性)成矿流体,通过大面积的交代(充填)作用形成强高级泥化蚀变和高品位高硫型浅成低温热液矿化的过程。其中,蚀变主要为高级泥化蚀变,能以弥散状高岭石或高岭石-明矾石脉的形式叠加破坏早期黄铁绢英岩化(图6a、b)。矿化主要为浸染状、脉状黄铁矿、硫砷铜矿、斑铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿、黄铜矿以及少量辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等矿化。其中,硫砷铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿等矿化充填交代早期斑岩成矿作用。蚀变-矿化脉体穿切关系看,浅成低温热液成矿作用也有明显多期活动特征(图6c)。根据矿物组合及脉体穿切关系,浅成低温热液成矿期(Ⅲ)可细分为Ⅲ-1黄铁矿-铜蓝-斑铜矿-硫砷铜矿-蓝辉铜矿-黄铜矿阶段和Ⅲ-2黄铁矿(闪锌矿-

方铅矿)阶段(图7)。其中,Ⅲ-1是主要的浅成低温热液矿化阶段,发育大量的明矾石±高岭石-硫化物脉(图6c、d)。明矾石粒度粗大,结晶程度较好,常用粗粒自形黄铁矿共生。部分他形黄铁矿产于自形明矾石外侧,局部可见自形明矾石产于自形粒状或环带状黄铁矿粒间,而蓝辉铜矿-铜蓝-斑铜矿-黄铜矿等铜矿化则以他形晶形式产于明矾石颗粒粒间(图6e、f)。同时对早期黄铁矿晶体进行广泛交代。Ⅲ-2是浅成低温热液矿化晚阶段,发育少量细粒的明矾石、高岭石。局部可见晚期细粒明矾石及细粒黄铁矿-斑铜矿-蓝辉铜矿-铜蓝脉再次充填于早期明矾石脉中间(图6f)部分晚期高岭石脉中可见少量方铅矿、闪锌矿矿化。矿物组合与结晶程度均反应浅成低温热液成矿作用晚期温度有明显降低。另外,流体活动晚期,能形成一系列细小裂隙穿切早期的明矾石-硫化物脉体(图6g、h)。整个浅成低温热液成矿期,形成的脉体均一含高岭石、明矾石等矿物N脉为主,局部有少量的D脉。

表生期(Ⅳ)主要指岩浆热液及浅成低温热液成矿作用结束后,受区域隆升剥蚀等多种因素的影响,浅地表地下水下渗,对浅部的已有矿化进行淋滤交代,并在局部形成次生富集的过程。蚀变主要为表生氧化,矿化主要为赤铁矿、褐铁矿化,偶见少量孔雀石和蓝铜矿。由于很快出现美日切错组火山岩的快速喷发覆盖,因此,铁格隆南矿区次生富集现象并不明显。主要的脉体类型以褐铁矿细脉为主,即L脉(图5)。

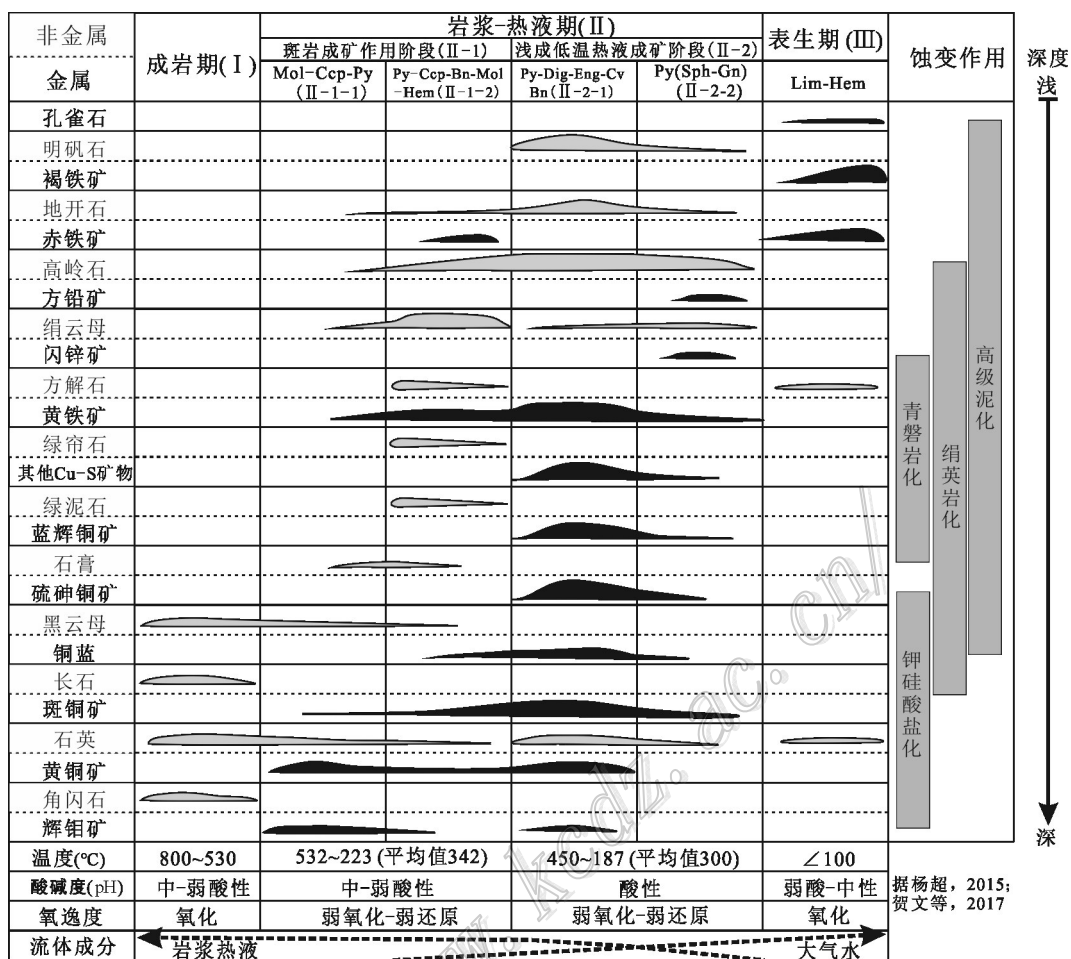


图 7 铁格隆南矿床成岩成矿期次(from Lin et al., 2017b; 矿物缩写见图 4~图 6)

Fig. 7 Petrogenetic and mineralization stage of the Tiegelongnan deposit(after Lin et al., 2017b, The mineral abbreviation is consistent with Fig.4~Fig.6)

5 讨论

5.1 岩浆活动与矿化蚀变作用时限

精细的锆石 U-Pb 年代学分析表明, 闪长玢岩侵位时间最早, 为(123.1±1.7)Ma(Lin et al., 2017a), 揭露范围较小, 发育细脉状黄铜矿-黄铁矿化, 既可能是成矿前的侵入体, 也有可能是与成矿作用有关(图 8)。花岗闪长斑岩作为矿区揭露面积最大, 矿化和蚀变最强的岩体, 与成矿作用关系最为密切, 结晶时代为(121.5±1.5)Ma, 略晚于闪长玢岩(Lin et al., 2017a)。在钻孔编录中, 虽未见闪长玢岩与花岗闪长斑岩间的穿切关系, 缺乏直接的野外证据揭示二类岩体之间的早晚关系。但从蚀变特征来看, 闪长玢岩整体蚀变较弱, 主要在局部发育青磐岩化蚀变,

而花岗闪长斑岩则蚀变强, 发育钾硅化、黄铁绢英岩化、高级泥化等。同时, 剖面图可以看出, 矿区蚀变系统明显以花岗闪长斑岩为中心, 逐步向外围扩散。闪长玢岩正是位于花岗闪长斑岩外围的青磐岩化蚀变带上。矿化方面, 闪长玢岩虽然发育弱黄铜矿、黄铁矿化, 但多以细脉状为主, 浸染状较少, 且并不是所有岩体段均发育矿化, 只是在青磐岩化蚀变较强的区段矿化较强。而花岗闪长斑岩则基本全部发育较强的铜矿化, 且浸染状矿化十分发育。所以, 就蚀变和矿化特征而言, 当花岗闪长斑岩发生侵位并引发大面积蚀变和铜矿化时, 闪长玢岩主要以外围围岩的形式, 局部发生矿化和蚀变。闪长玢岩与成矿作用关系并不大, 其侵位时限应早于花岗闪长斑岩, 地质现象与年代学结果吻合。而地表大面积分布的安山岩、英安岩等火山岩, 形成时代为(111.7±1.6)

Ma,明显晚于闪长玢岩和花岗闪长斑岩,无明显矿化,代表成矿后火山活动的产物(图2,图8)。

此外,虽然笔者对不同部位、不同蚀变类型的花岗闪长斑岩进行了年代学测试,但几者间的年龄值十分相近,在误差范围内基本一致,均为120~121 Ma(另文发表)。同时,野外实际编录和镜下鉴定中,上述岩体的矿物成分及特征基本一致,只是经历不同类型的蚀变。所以单纯从岩石类型及年代学结果看,花岗闪长斑岩整体为一期岩浆活动的产物。但是从钻孔3204深部(约841.4~1067.9 m段)可以发现花岗闪长斑岩侵位并引发了角砾岩化,早期花岗闪长斑岩呈角砾状被晚期花岗闪长斑岩捕获。因此,花岗闪长斑岩可能还是存在多期活动,只是几者间时间间隔短,不易识别。

蚀变矿物⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学和成矿年代学分析表明,代表钾硅化的黑云母和代表黄铁绢英岩化的绢云母,分别形成于(121.1±0.6) Ma和(120.8±0.9) Ma(Lin et al., 2017b),与代表斑岩成矿作用的辉钼矿Re-Os同位素年龄((121.2±0.6) Ma)基本一致(Lin et al., 2017a),同时与花岗闪长斑岩的侵位时代也基本一致,说明早期与中酸性侵入体有关的斑岩矿化及蚀变系统的完整存在(图8)。而代表高级泥化的明矾石的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为(117.9±1.6) Ma(Lin et al., 2017b),与黄铁矿的Rb-Sr年代学分析结果((117.5±1.8) Ma)基本一致(Lin et al., 2017b),二者分别代表浅成低温热液成矿作用的蚀变和矿化时限(图8)。所以,浅成低温热液成矿作用,在时间上略晚于早期斑岩成矿作用,在空间上大面积叠加在斑岩矿化和蚀变系统上,与野外地质现象一致,共同建立铁格隆南矿床岩浆-蚀变-矿化时空格架(图8)。

5.2 成矿作用模型

铁格隆南斑岩-浅成低温热液矿床作为多龙矿集区资源量最大、成矿作用最为复杂的矿床,其成矿作用过程对整个区域的综合研究及勘查找矿有重要的指示意义。本文根据上述矿床地质特征、岩石学、蚀变与矿化年代学分析结果,认为铁格隆南矿床属于斑岩-浅成低温热液叠加型铜多金属矿床,其主要成岩成矿作用过程如下。

岩浆热液成矿作用(123~119 Ma) 闪长玢岩和花岗闪长斑岩先后发生侵位,并形成钾硅化和青磐岩化,后期广泛叠加黄铁绢英岩化。锆石U-Pb测年结果表明,闪长玢岩侵位时限为(123.1±1.7) Ma,4组花岗闪长斑岩结晶年龄分别(121.5±1.5) Ma、

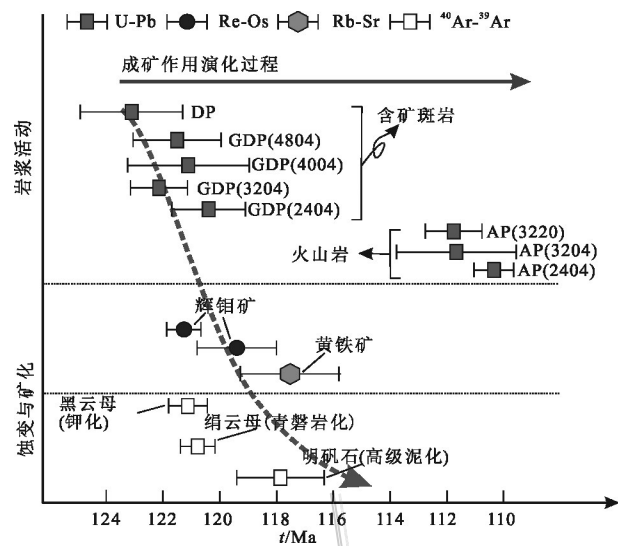


图8 铁格隆南矿床岩浆-蚀变与矿化时间格架 (据 Lin et al., 2017b)

DP—闪长玢岩; GDP—花岗闪长斑岩; AP—安山(玢)岩
括号内数字代表钻孔号

Fig. 8 Magmatism-alteration and mineralization framework of the Tiegelongnan deposit(after Lin et al., 2017b)

DP—Diorite porphyry; GDP—Granodiorite porphyry;
AP—Andesite porphyry

The number in the bracket represents drilling number

(121.2±2.4) Ma, (122.1±1.0) Ma和(120.4±1.3) Ma, 略晚于闪长玢岩侵位。钻孔中热液隐爆角砾岩的存在说明花岗闪长斑岩存在多期岩浆活动。成矿作用中矿化主要为脉状、网脉状、浸染状黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿、辉钼矿等,铜矿化品位多介于0.2%~0.4%,局部高达0.8%。脉体类型以B脉为主,有少量的A、D脉。其中,B脉主要为石英-黄铁矿-黄铜矿±斑铜矿脉,或石英-黄铁矿-辉钼矿±黄铜矿脉;A脉主要为无矿石英脉,石英-黄铁矿脉,石英-辉钼矿±硬石膏脉,黄铁矿-黑云母细脉等;D脉主要为石英-黄铁矿脉,黄铁矿-黄铜矿-赤铁矿脉,黄铁矿-黄铜矿脉等。年代学结果表明,钾硅化中热液黑云母 Ar-Ar 蚀变年龄为(121.1±0.6) Ma,而黄铁绢英岩化中绢云母的 Ar-Ar 蚀变年龄为(120.8±0.9) Ma,略晚于钾硅化蚀变。辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为(121.2±1.2) Ma,误差范围内与钾硅化和黄铁绢英岩化蚀变作用时限一致。

浅成低温热液成矿作用(118~117 Ma) 深部岩浆的持续活动促使岩浆蒸汽和流体与浅部地下水发生广泛混合,形成酸性流体,从而在浅部斑岩体及围

岩中形成广泛的高级泥化蚀变,代表性蚀变矿物为高岭石、明矾石、地开石等。高级泥化蚀变能叠加改造早期的钾硅化、绢英岩化和青磐岩化蚀变。矿化主要为脉状、浸染状、块状黄铁矿、硫砷铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿以及少量的辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等,铜矿化品位多大于0.4%,局部可大于0.8%。脉体类型以N脉为主,局部有少量残留的B脉、D脉。其中,N脉主要为含高岭石硫化物脉和含明矾石硫化物脉,以及少量的地开石细脉。年代学结果表明,高级泥化蚀变中明矾石 Ar-Ar 蚀变年龄为(117.9±1.6) Ma,晚于钾硅化和黄铁绢英岩化蚀变时限。粗粒自形的黄铁矿的 Rb-Sr 同位素年龄为(117.5±1.8) Ma,误差范围内与明矾石蚀变作用时限一致。在斑岩成矿作用与浅成低温热液成矿作用之间,区域存在短暂的隆升剥蚀,不仅导致斑岩蚀变与矿体向上抬升,也促使高硫型浅成低温热液蚀变与矿化逐步向深部延伸,改造早期蚀变与矿化,形成浅成低温热液广泛叠加于斑岩系统的现象。

火山岩覆盖保存作用(111~110 Ma) 当铁格隆南矿床形成后,受班怒洋的北向俯冲,导致区域形成隆升剥蚀,矿区中古风化壳的识别说明存在明显剥蚀作用,利用区域剥蚀速率(0.15 mm/a)计算,118~111 Ma 之间铁格隆南矿最小剥蚀厚度为600~1200 m(宋扬等,2017)。111 Ma 左右,深部岩浆再次活化,在矿集区内广泛喷出安山岩、英安岩等火山岩,形成美日切错组。这类火山岩广泛覆盖在铁格隆南矿区地表,良好的保存剩余铜金矿体免受大规模剥蚀。

6 结 论

(1) 铁格隆南矿床发育钾硅化、青磐岩化、黄铁绢英岩化和高级泥化。其中,钾硅化主要以热液黑云母蚀变为主,青磐岩化主要为以弥散状、脉状绿泥石、绿帘石蚀变,黄铁绢英岩化指长石组分蚀变为弥散状细粒绢云母、石英和少量高岭石。高级泥化蚀变主要为脉状、弥散状高岭石、明矾石、地开石化。矿床脉体系统发育,主要为A、B、D、N型及少量L型脉体。

(2) 铁格隆南矿床成岩成矿作用,从早到晚划分为4期,即岩浆期、岩浆热液期、浅成低温热液期和表生期。其中,岩浆热液期与浅成低温热液期与成矿作用关系密切。

(3) 矿床成矿作用划分为3个阶段,即岩浆热液成

矿作用(123~119 Ma)、浅成低温热液成矿作用(118~117 Ma)和火山岩覆盖保存作用(111~110 Ma)。

志 谢 感谢中铝西藏金龙矿业股份有限公司为笔者提供的野外支持,感谢西藏地勘局第五地质大队对野外工作的帮助。感谢匿名审稿专家提出的宝贵审改意见。

References

- Cao S H, Luo X C, Tang F L and Chen L G. 2004. Time-space structure and evolution of the arc-basin system on the southern side of the Bangong Co-Nujiang junction zone[J]. *Geology in China*, 31 (1):51-56 (in Chinese with English abstract).
- Cao S H, Deng S Q, Xiao Z J and Liao L G. 2006. The archipelagic arc tectonic evolution of the Meso-Tethys in the western part of the Bangong Lake-Nujiang suture zone[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26 (4):25-32 (in Chinese with English abstract).
- Ding S, Chen Y C, Tang J X, Zheng W B, Lin B and Yang C. 2017. Petrogenesis and tectonics of the Naruo porphyry Cu (Au) deposit related intrusion in the Duolong area, Central Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 91: 581-601.
- Du D D, Qu X M, Wang G H and Xin H B. 2011. Bidirectional subduction of the Middle Tethys oceanic basin in the west segment of Bangonghu-Nujiang suture, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LA-ICP-MS dating and petrogeochemistry of arc granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7):1993-2002 (in Chinese with English abstract).
- Fan J J, Li C, Xu J X and Wang M. 2014. Petrology, geochemistry, and geological significance of the Nadong ocean island, Banggongco-Nujiang suture, Tibetan plateau[J]. *International Geology Review*, 56: 915-928.
- Fan J J, Li C, Sun Z M, Xu W, Wang M and Xie C M. 2018. Early Cretaceous MORB-type basalt and A-type rhyolite in northern Tibet: Evidence for ridge subduction in the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 187-201.
- Fang X, Tang J X, Song Y, Yang C, Ding S, Wang Y Y, Wang Q, Sun X G, Li Y B, Wei L J, Zhang Z, Yang H H, Gao K and Tang P. 2015. Formation epoch of the South Tiegelong superlarge epithermal Cu (Au-Ag) deposit in Tibet and its geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(2): 168-176 (in Chinese with English abstract).

- Gao K, Tang J X, Song Y, Liu Z B, Fang X, Yang H H, Wang Q, Lin B and Song J L. 2016. Fluid inclusion study of the cryptoexplosive breccias in the Naruo Cu(Au) deposit of Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 52(5):815-825 (in Chinese with English abstract).
- Gao K, Tang T X, Song Y, Fang X, Yang H H, Wang Q, Lin B and Wang Y Y. 2017. Genesis of magmatic rocks of cryptoexplosive breccia in the Naruo deposit of Tibet: Evidence from zircon Hf isotope[J]. *Geology and Exploration*, 53(2):207-216 (in Chinese with English abstract).
- Geng Q R, Zhang Z, Peng Z M, Guan J L, Zhu X P and Mao X C. 2016. Jurassic-Cretaceous granitoids and related tectono-metallrogenesis in the Zapug-Duobuza arc, western Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 77: 163-175.
- Gustafson L B and Hunt J P. 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile[J]. *Econ. Geol.*, 70:857-912.
- Gustafson L B. 1995. Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile[J]. *Econ. Geol.*, 90: 2-16.
- He W, Lin B, Yang H H, Fang X, Song Y X, Wei S G and Hou L. 2017. Fluid inclusion feature and its internal relationship with mineralization and epithermal alteration of the Tiegelongnan Cu-Au deposit[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(5):638-650 (in Chinese with English abstract).
- Huang T T, Xu J F, Chen J L, Wu J b and Zeng Y C. 2017. Sedimentary record of Jurassic northward subduction of the Bangong-Nujiang Ocean: Insights from detrital zircons[J]. *International Geology Review*, 59: 166-184.
- Kapp P, Murphy M A, Yin A, Harrison T M, Ding L and Guo J. 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics* 22: doi: 10.1029 / 2001TC001332, 2003.
- Li C, Huang X P, Zhai Q G, Zhu T X, Yu Y S, Wang G H and Zhai Q G. 2006. The Longmu Co-Shuanghu-Jitang plate suture and the northern boundary of Gondwanaland in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Sciences Frontiers*, 13(4):136-147 (in Chinese with English abstract).
- Li G M, Zhang X N, Qin K Z, Sun X G, Zhao J X, Yin X B, Li J X and Yuan H S. 2015. The telescoped porphyry-high sulfidation epithermal Cu(-Au) mineralization of Rongna deposit in Duolong ore cluster at the southern margin of Qiangtang Terrane, Central Tibet: Integrated evidence from geology, hydrothermal alteration and sulfide assemblages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8):2307-2324 (in Chinese with English abstract).
- Li J X, Qin K Z, Li G M, Xiao B, Zhao J X, Cao M J and Chen L. 2013. Petrogenesis of ore-bearing porphyries from the Duolong porphyry Cu-Au deposit, Central Tibet: Evidence from U-Pb geochronology, petrochemistry and Sr-Nd-Hf-O isotope characteristics[J]. *Lithos*, 160-161: 216-227.
- Li Y B, Duo J, Zhong W T, Li Y C, Qiangba W D, Chen H Q, Liu H F, Zhang J S, Zhang T P, Xu Z Z, Fan A H and Suolang W Q. 2012a. An exploration model of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Gaize Country, northern Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 48(2): 274-287 (in Chinese with English abstract).
- Li Y B, Zhong W T, Zhang T P, Chen H A, Li Y C, Chen H Q and Fan A H. 2012b. Geochemical characteristics and genesis of the Bolong porphyry copper-gold deposit in Gerze County, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4):579-587 (in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Zhang Z, Zheng W B, Leng Q F, Zhong W T and Ying L J. 2012. Preliminary study of fissure system in Jiama porphyry deposit of Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 31 (3):579-589 (in Chinese with English abstract).
- Lin B, Chen Y C, Tang J X, Song Y, Wang Q, Feng J, Li Y B, Tang X Q, Lin X, Liu Z B, Wang Y Y, Fang X, Yang C, Yang H H, Li L and Gao K. 2016. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the ore-bearing porphyry in Dibao Cu(Au) deposit, Duolong ore concentration area, Xizang(Tibet), and its geological significance[J]. *Geological Review*, 62(6): 1565-1578 (in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Chen Y C, Song Y C, Hall G, Wang Q, Yang C, Fang X, Duan J L and Yang H H. 2017a. Geochronology and genesis of the Tiegelongnan porphyry Cu (Au) deposit in Tibet: Evidence from U-Pb, Re-Os dating and Hf, S, and H-O isotopes[J]. *Resource Geology*, 67:1-21.
- Lin B, Chen Y C, Tang J X, Wang Q, Song Y, Yang C, Wang W L, He W and Zhang L J. 2017b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr ages of the Tiegelongnan porphyry Cu-(Au) deposit in the Bangong Co-Nujiang metallogenic belt of Tibet, China: Implication for generation of super-large deposit[J]. *Acta Geoscientia Sinica* (English edition), 91: 602-616.
- Lin B, Tang J X, Song Y, Wang Q, Cao H W, Michael Baker, Zhang L J and Li Y B. 2017. Petrogeochemistry and SHRIMP dating of Ga'erqin pillow basalt in Duolong, northern Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(5):702-710 (in Chinese with English abstract).

- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 66, 1-33.
- Metcalfe I and Kyi Pyar A. 2014. Late Tournaisian conodonts from the Taungnyo Group near Loi Kaw, Myanmar (Burma): Implications for Shan Plateau stratigraphy and evolution of the Gondwana-derived Sibumasu terrane[J]. *Gondwana Research*, 26: 1159-1172.
- Pan G T, Zheng H X, Xu Y R, Wang P S and Jiao S P. 1983. A preliminary study on Bangong Co-Nujiang suture[C]. *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (TIBET) Plateau*, (4):229-242 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Xin H B, Du D D and Chen H. 2013. Magma source of the A-Type granite and slab break-off in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(6):759-772 (in Chinese with English abstract).
- Shi R D, Griffin W L, O'Reilly SY, Huang Q S, Zhang X R, Liu D L, Zhi X C, Xia Q X and Ding L. 2012. Melt/mantle mixing produces podiform chromite deposits in ophiolites: Implications of Re-Os systematics in the Dongqiao Neo-tethyan ophiolite, northern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 21: 194-206.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105: 3-41.
- Song Y, Yang H H, Lin B, Liu Z B, Wang Q, Gao K, Yang C and Fang X. 2017. The preservation system of epithermal deposits in south Qiangtang terrane of Central Tibetan Plateau and its significance: A case study of the Tiegelongnan superlarge deposit[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(5):659-669 (in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Sun X G, Ding S, Wang Q, Wang Y Y, Yang C, Chen H Q, Li Y B, Li Y B, Wei L J, Zhang Z, Song J, Duan J L, Gao K, Fang X and Tan J Y. 2014. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(1):6-10 (in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Lang X H, Xie F W, Gao Y M, Li Z, Huang Y, Ding F, Yang H H, Zhang L, Wang Q and Zhou Y. 2015. Geological characteristics and genesis of the Jurassic No. I porphyry Cu-Au deposit in the Xiongacun district, Gangdese porphyry copper belt, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews* 70: 438-456.
- Tang J X, Song Y, Wang Q, Lin B, Yang C, Guo N, Fang X, Yang H H, Wang Y Y, Gao K, Ding S, Zhang Z, Chen H H, Su D K, Feng J, Liu Z B, Wei S G, He W, Song J L, Li Y B and Wei L J. 2016. Geological characteristics and exploration model of the Tiegelongnan Cu (Au-Ag) deposit: The first ten million tons metal resources of a porphyry-epithermal deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(6):663-690 (in Chinese with English abstract).
- Wang G M and Zhong J H. 2002. Tectonic-sedimentary evolution of the west segment of the Bangong Co-Nujiang structural belt in the Triassic and Jurassic[J]. *Geological Review*, 48(3): 297-303 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Tang J X, Xie F W, Lin B, Li Y B and Guo X Y. 2017. Copper resource in Qinghai-Tibet plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35(12):89-95 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y Y, Tang J X, Song Y, Lin B, Yang C, Wang Q, Gao K and Ding S. 2017. Geochemical characteristics of sulfur and lead isotopes from the superlarge Tiegelongnan copper (gold-silver) deposit, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(5): 627-637 (in Chinese with English abstract).
- Wei S G, Tang J X, Song Y, Liu Z B, Feng J and Li Y B. 2017a. Early Cretaceous bimodal volcanism in the Duolong Cu mining district, western Tibet: Record of slab breakoff that triggered ca. 108~113 Ma magmatism in the western Qiangtang terrane[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138: 588-607.
- Wei S G, Song Y, Tang J X, Liu Z B, Wang Q, Lin B, Feng J, Hou L and Danzhen W X. 2017b. Geochronology, geochemistry, Sr-Nd-Hf isotopic compositions, and petrogenetic and tectonic implications of Early Cretaceous intrusions associated with the Duolong porphyry-epithermal Cu-Au deposit, Central Tibet[J]. *International Geology Review*, DOI: 10.1080/00206814.2017.1369178.
- Xu M J, Li C, Zhang X Z and Wu Y G. 2014. Nature and evolution of the Neo-Tethys in Central Tibet: Synthesis of ophiolitic petrology, geochemistry, and geochronology[J]. *International Geology Review*, 56: 1072-1096.
- Yang C, Tang J X, Wang Y Y, Yang H H, Wang Q, Sun X G, Feng J, Yin X B, Ding S, Fang X, Zhang Z and Li Y B. 2014. Fluid and geological characteristics researches of southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits* 33(6): 1287-1305 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y, Zhang Z, Tang J X, Chen Y C, Li Y B, Wang L Q, Li J L, Gao K, Wang Q and Yang H H. 2015. Mineralization, alteration and vein systems of the Bolong porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area, Tibet[J]. *Geology in China*, 42(3): 759-776 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z M, Hou Z Q, Song Y C, Li Z Q, Xia D X and Pan F C. 2008. Qulong superlarge porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 27(3): 279-318 (in Chinese with English abstract).

- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- Zhai Q G, Jahn B M, Su L, Ernst R E, Wang K I, Zhang R Y, Wang J and Tang S. 2013. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of a mafic dyke swarm in the Qiangtang terrane, northern Tibet and geodynamic implications[J]. *Lithos*, 174: 28-43.
- Zhang Z, Chen Y C, 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).
- Zhang Z, Fang X, Tang J X, Wang Q, Yang C, Wang Y Y, Ding S and Yang H H. 2017. Chronology, geochemical characteristics of the Gaerqin porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area in Tibet and discussion about the identification of the lithoscapes and the possible epithermal deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 476-494 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Pan G T, Mo X X, Wang L Q, Zhao Z D, Gen Q R and Dong G C. 2006. Identification for the Mesozoic OIB-type basalts in Central Qinghai-Tibetan Plateau: Geochronology, geochemistry and their tectonic setting[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 80(9): 1312-1328 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, Zhao Z D, Wang L Q, Liu Y S and Wu F Y. 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the Central Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Chemical Geology*, 268: 298-312.
- Zhu D C, Li S M, Cawood P A, Wang Q, Zhao Z D, Liu S A and Wang L Q. 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in Central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 245: 7-17.
- 曹圣华, 罗小川, 唐峰林, 陈鲁根. 2004. 班公湖-怒江结合带南侧弧-盆系时空结构与演化特征[J]. *中国地质*, 31(1): 51-56.
- 曹圣华, 邓世权, 肖志坚, 廖六根. 2006. 班公湖-怒江结合带西段中特提斯多岛弧构造演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 26(4): 25-32.
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 辛洪波, 刘治博. 2011. 西藏班公湖-怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据[J]. *岩石学报*, 27(7): 1993-2002.
- 方向, 唐菊兴, 宋扬, 杨超, 丁帅, 王艺云, 王勤, 孙兴国, 李玉彬, 卫鲁杰, 张志, 杨欢欢, 高轲, 唐攀. 2015. 西藏铁格隆南超大型浅成低温热液铜(金、银)矿床的形成时代及其地质意义[J]. *地球学报*, 36(2): 168-176.
- 高轲, 唐菊兴, 宋扬, 刘治博, 方向, 杨欢欢, 王勤, 林彬, 宋俊龙. 2016. 西藏拿若铜(金)矿床隐爆角砾岩流体包裹体研究[J]. *地质与勘探*, 52(5): 815-825.
- 高轲, 唐菊兴, 宋扬, 刘治博, 方向, 杨欢欢, 王勤, 林彬, 王艺云. 2017. 西藏拿若隐爆角砾岩中岩浆岩成因: 来自锆石 Hf 同位素证据[J]. *地质与勘探*, 53(2): 207-216.
- 贺文, 林彬, 杨欢欢, 方向, 宋英昕, 韦少港, 侯淋. 2017. 西藏铁格隆南 Cu-Au 矿床成矿流体特征及与矿化蚀变的内在联系[J]. *地球学报*, 38(5): 638-650.
- 李才, 黄小鹏, 翟庆国, 朱同兴, 于远山, 王根厚, 曾庆高. 2006. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界[J]. *地学前缘*, 13(4): 136-147.
- 李光明, 张夏楠, 秦克章, 孙兴国, 赵俊兴, 印贤波, 李金祥, 袁华山. 2015. 羌塘南缘多龙矿集区荣那斑岩-高硫型浅成低温热液 Cu-(Au) 套合成矿: 综合地质、热液蚀变及金属矿物组合证据[J]. *岩石学报*, 31(8): 2307-2324.
- 李玉彬, 多吉, 钟婉婷, 李玉昌, 强巴旺堆, 陈红旗, 刘鸿飞, 张金树, 张天平, 徐志忠, 范安辉, 索朗旺钦. 2012a. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床勘查模型[J]. *地质与勘探*, 48(2): 274-287.
- 李玉彬, 钟婉婷, 张天平, 陈华安, 李玉昌, 陈红旗, 范安辉. 2012b. 西藏改则县波龙斑岩型铜金矿床地球化学特征及成因浅析[J]. *地球学报*, 33(4): 579-587.
- 林彬, 唐菊兴, 张志, 郑文宝, 冷秋锋, 钟婉婷, 应立娟. 2012. 西藏甲玛斑岩矿床裂隙系统的初步研究及意义[J]. *矿床地质*, 31(3): 579-589.
- 林彬, 陈毓川, 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 冯军, 李彦波, 唐晓倩, 林鑫, 刘治博, 王艺云, 方向, 杨超, 杨欢欢, 费凡, 李力, 高轲. 2016. 西藏多龙矿集区地堡 Cu(Au) 矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *地质论评*, 62(6): 1565-1578.
- 林彬, 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 曹华文, Michael B, 张乐骏, 李玉彬. 2017. 藏北多龙矿集区尕尔勤枕状玄武岩地球化学及 SHRIMP 测年[J]. *地球学报*, 38(5): 702-710.
- 潘桂棠, 郑海翔, 徐跃荣, 王培生, 焦淑沛. 1983. 初论班公湖-怒江结合带[C]. *青藏高原地质文集*, 4: 229-242.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 陈华. 2013. 西藏班公湖-怒江缝合带中段 A-型花岗岩的岩浆源区与板片断离[J]. *地质学报*, 87(6): 759-772.
- 宋扬, 杨欢欢, 林彬, 刘治博, 王勤, 高轲, 杨超, 方向. 2017. 青藏高原羌塘地体南缘浅成低温热液成矿系统的保存机制及其重要意义——以铁格隆南超大型矿床为例[J]. *地球学报*, 38(5): 659-

附中文参考文献

- 669.
- 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 王勤, 王艺云, 杨超, 陈红旗, 李彦波, 李玉彬, 卫鲁杰, 张志, 宋俊龙, 杨欢欢, 段吉琳, 高轲, 方向, 谭江云. 2014. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报, 35(1):6-10.
- 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 林彬, 杨超, 郭娜, 方向, 杨欢欢, 王艺云, 高轲, 丁帅, 张志, 段吉琳, 陈红旗, 栗登遼, 冯军, 刘治博, 韦少港, 贺文, 宋俊龙, 李彦波, 卫鲁杰. 2016. 西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型——西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报, 37(6):663-690.
- 王冠民, 钟建华. 2002. 班公湖-怒江构造带西段三叠纪—侏罗纪构造-沉积演化[J]. 地质论评, 48(3):297-303.
- 王勤, 唐菊兴, 谢富伟, 林彬, 李玉彬, 郭晓宇. 2017. 青藏高原铜矿资源研究进展[J]. 科技导报, 35(12):89-95.
- 王艺云, 唐菊兴, 宋扬, 林彬, 杨超, 王勤, 高轲, 丁帅. 2017. 西藏铁格隆南超大型 Cu(Au、Ag)矿床 S、Pb 同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 38(5):627-637.
- 杨超, 唐菊兴, 王艺云, 杨欢欢, 王勤, 孙兴国, 冯军, 印贤波, 丁帅, 方向, 张志, 李玉彬. 2014. 西藏铁格隆南浅成低温热液型-斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究[J]. 矿床地质, 33(6):1287-1305.
- 杨毅, 张志, 唐菊兴, 陈毓川, 李玉彬, 王立强, 李建力, 高轲, 王勤, 杨欢欢. 2015. 西藏多龙矿集区波龙斑岩铜矿床蚀变与脉体系统[J]. 中国地质, 42(3):759-776.
- 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 李振清, 夏代详, 潘凤雏. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床:地质、蚀变与成矿[J]. 矿床地质, 27(3):279-318.
- 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.
- 张志, 方向, 唐菊兴, 王勤, 杨超, 王艺云, 丁帅, 杨欢欢. 2017. 西藏多龙矿集区尕尔勤斑岩铜矿床年代学及地球化学——兼论硅帽的识别与可能的浅成低温热液矿床[J]. 岩石学报, 33(2):476-494.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 廖忠礼, 耿全如, 董国臣. 2006. 青藏高原中部中生代 OIB 型玄武岩的识别:年代学、地球化学及其构造环境[J]. 地质学报, 80(9):1312-1328.