

西藏多龙矿集区铁格隆南铜(金)矿床 黄铁矿特征及意义

张 琪¹⁾, 陈 伟^{2)*}, 杨欢欢²⁾, 付雪莲³⁾, 王 勤³⁾, 李彦波⁴⁾,
李宏伟⁴⁾, 辛 堂⁴⁾, 梁鑫娟³⁾, 李 社⁵⁾, 刘长城⁵⁾

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2) 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;

3) 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059;

4) 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海格尔木 816000;

5) 中铝西藏金龙矿业股份有限公司, 西藏拉萨 850000

摘 要: 铁格隆南斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床是班公湖—怒江成矿带上最重要的矿床之一。本文以矿床内发育的黄铁矿为主要研究对象, 对其开展微量元素、稀土元素和硫同位素分析。依据产出状态, 黄铁矿可以分为黄铁矿-1, 黄铁矿-2 和黄铁矿-3, 其中黄铁矿-2 与浅成低温热液型矿化相关, 黄铁矿-3 与斑岩型矿化相关。黄铁矿-1 的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi 的含量最低, 黄铁矿-2 的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi 的含量最高。Cu 和 Ni、Ag 和 Cu、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb、Pb 和 Zn 的相关性可作为黄铁矿-2 和黄铁矿-3 的辨别标志。黄铁矿-1 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(1.9‰)最大; 黄铁矿-2 和黄铁矿-3 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在-4.5‰~0.3‰之间。黄铁矿富集轻稀土, 亏损重稀土, 具有“右倾”式稀土配分模式, 浅部(200—450 m)黄铁矿的轻重稀土分异程度较大, 以正铈异常为主, 而深部(700—1000 m)黄铁矿轻重稀土分异相对较小, 以负铈异常为主。铁格隆南矿床含硫热液运移方向为横向上从 ZK1604 向东运移, 纵向以 ZK1604 的 230—250 m 为中心向深部和侧向运移。黄铁矿中高含量的 Cu、Au、Ag 以及 Ag 和 Cu、Pb 和 Zn、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb 的正相关性是指示浅成低温热液型矿化的重要标志, 而黄铁矿内 Cu 和 Ni 的负相关性是指示斑岩型矿化的标志。

关键词: 西藏; 铁格隆南斑岩-浅成低温热液型矿床; 黄铁矿; 元素地球化学; 硫同位素

中图分类号: P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.032301

Characteristic and Significance of Pyrite at Tiegelongnan Cu (Au) Deposit, Duolong Ore District, Tibet

ZHANG Qi¹⁾, CHEN Wei^{2)*}, YANG Huan-huan²⁾, FU Xue-lian³⁾, WANG Qin³⁾, LI Yan-bo⁴⁾,
LI Hong-wei⁴⁾, XIN Tang⁴⁾, LIANG Xin-juan³⁾, LI She⁵⁾, LIU Chang-cheng⁵⁾

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

4) No.5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Golmud, Qinghai 816000;

5) Gold Dragon Mining Co., Ltd., Lhasa, Tibet 850000

本文由国家重点研发计划项目“西藏铜多金属资源基地绿色勘查与增储示范”(编号: 2022YFC2905001)、国家自然科学基金项目(编号: 42002103)和中国地质调查局地质调查项目“铜(金)铋等紧缺战略性矿产调查与潜力评价”(编号: DD20230054)联合资助。

收稿日期: 2022-11-07; 改回日期: 2023-03-22; 网络首发日期: 2023-03-26。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 张琪, 男, 1998 年生。博士研究生。地质资源与地质工程专业。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。

E-mail: HanZQ497@outlook.com。

*通讯作者: 陈伟, 男, 1984 年生。博士, 副研究员。主要从事矿床学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。

E-mail: nmgchenwei@163.com。

Abstract: The Tiegelongnan porphyry-epithermal Cu (Au) deposit is one of the most important deposits in the Bangongco–Nuijiang metallogenic belt, where pyrite is extensively developed. In this study, trace elements, rare earth elements (REE), and S isotopes of pyrite were analyzed. Three types of pyrite were identified according to their occurrence characteristics: pyrite-1 and pyrite-2 were related to epithermal mineralization, and pyrite-3 was related to porphyry mineralization. Pyrite-1 had the lowest Au, Ag, Cu, Pb, Zn, and Bi concentrations, whereas pyrite-2 had the highest Au, Ag, Cu, Pb, Zn, and Bi concentrations. The correlations between Cu and Ni, Ag and Cu, Cu and Pb, Ag and Pb, and Pb and Zn could be used to distinguish pyrite-2 from pyrite-3. The $\delta^{34}\text{S}$ value for pyrite-1 (1.9‰) was the highest among the three types. The $\delta^{34}\text{S}$ values for pyrite-2 and pyrite-3 were between -4.5‰ and 0.3‰ , respectively. Pyrite was rich in LREE and depleted HREE and had a “right tilt” pattern in REE distribution. The REE differentiation of pyrite in the shallow deposits (200–450 m) was relatively large with a positive Eu anomaly, whereas the REE differentiation of pyrite in deeper deposits (700–1000 m) was small with a negative Eu anomaly. The migration direction of the sulfur-containing hydrothermal solution in the Tiegelongnan deposit was horizontal from ZK1604 towards the East and vertical from 230–250 m at ZK1604 to the deep and lateral. The high concentrations of Cu, Au, and Ag in pyrite and the positive correlations between Ag and Cu, Pb and Zn, Cu and Pb, and Ag and Pb were important indicators of epithermal mineralization, whereas the negative correlation between Cu and Ni in pyrite indicated porphyry mineralization.

Key words: Tibet; Tiegelongnan porphyry-epithermal deposit; pyrite; element geochemistry; S isotope

班公湖—怒江成矿带与早白垩世岛弧型中酸性岩有关的铜、金、银、铅锌矿床成矿亚系列,以及冈底斯成矿带与早侏罗世—晚侏罗世岛弧型中酸性岩有关的铜、金、银、铅锌矿床成矿亚系列,是西藏最具潜力的斑岩型-浅成低温热液型铜金矿床的矿床成矿系列(唐菊兴等, 2014a)。铁格隆南铜(金)矿床作为班公湖—怒江成矿带上最重要的矿床之一,是西藏首例浅成低温热液型矿床(唐菊兴等, 2014b),其铜资源量大于 10 Mt, 平均品位为 0.53%, 金资源量大于 120 t, 平均品位为 0.13 g/t(唐菊兴等, 2016)。铁格隆南高硫型浅成低温热液型铜(金)矿床的发现,无疑为在西藏寻找更多的斑岩型-浅成低温热液型矿床提供了巨大的动力。铁格隆南斑岩型-浅成低温热液型铜金矿床发育浅成低温热液矿床所特有的矿物组合、蚀变分带和矿化特征,矿床内广泛发育的黄铁矿与矿化关系密切,常被铜矿物交代。

黄铁矿在地壳中广泛发育,是地壳中主要的硫化物和各种金矿床的主要载金矿物(Deditius et al., 2014),也是沉积物中微量金属元素的主要赋存矿物之一(Huerta-Diaz and Morse, 1992; Dellwig et al., 2002; Lowers et al., 2007; Neumann et al., 2013)。理想情况下黄铁矿的化学式为 FeS_2 , 而自然界中的黄铁矿则具有与之不同的化学式(Abratis et al., 2004)。黄铁矿中常常具有高含量的微量元素,这些微量元素或者以置换形式存在黄铁矿晶格中,或者以纳米或微细包体形式赋存在黄铁矿中(Huston et al., 1995; Deditius et al., 2011)。黄铁矿的成分特征蕴含着巨大的信息,其 Co/Ni 比值,可以指示矿床的成因;As、Sb(尤其是 As)的变化特征可以有效判断矿床的温度和标高;S/Fe 值也具有一定的指示意义,如黄铁矿型铜矿床中发育的黄铁矿具有亏硫的

特征,而中低温热液矿床中发育的黄铁矿具有亏 S、亏 Fe 的特征(陈光远等, 1987, 1989; 李胜荣等, 1996; 赵洁心和鲍明学, 2007)。黄铁矿的晶体形态则可以指示黄铁矿形成环境的硫逸度、温度特征(Murowchick and Barnes, 1987)。

本文对铁格隆南矿床发育的黄铁矿进行元素地球化学及硫同位素分析,以期通过不同深度和不同类型的黄铁矿中化学成分和硫同位素特征,探讨西藏斑岩-浅成低温热液型矿床的黄铁矿化学特征对其形成深度的指示意义,建立多龙矿集区斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床的黄铁矿标型特征,为进一步矿产勘查提供依据。

1 区域地质特征

班公湖—怒江成矿带横贯青藏高原中部,内部发育多条蛇绿混杂岩带,西起班公湖,向东经改则—安多—丁青后沿怒江进入滇西,全长超过 2 200 km(Shi, 2007),是拉萨地体和羌塘地体的分界(Girardeau et al., 1984; Yin and Harrison, 2000; Pan et al., 2012; Metcalfe, 2013),其向北延伸至羌塘地体南缘、往南跨至拉萨地体北部,带内分布众多斑岩型、矽卡岩型、造山型铜金铁矿床(点),矿化的形成贯穿于班公湖—怒江洋盆开启到闭合演化的各个阶段(宋扬等, 2014)。

西藏多龙矿集区位于班公湖—怒江成矿带西段,大地构造位置属于羌塘—三江复合板片南缘,班公湖—怒江缝合带北缘,是目前班公湖—怒江成矿带上重要的矿集区之一。多龙矿集区内主要矿床为多不杂斑岩型铜(金)矿床、波龙斑岩型铜(金)矿床(余宏全等, 2009; 李玉彬等, 2012a, b; 祝向平等, 2012; Li G M et al., 2012; Li J X et al., 2013, 2014)、铁格隆

南斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床、拿若斑岩型铜(金)矿床(唐菊兴等, 2014a, b, 2016; 方向等, 2014; 杨超等, 2014; Lin et al., 2017)、地堡那木岗(林彬等, 2016)、拿顿、色那、赛角、尕尔勤等矿床。

2 矿区地质特征

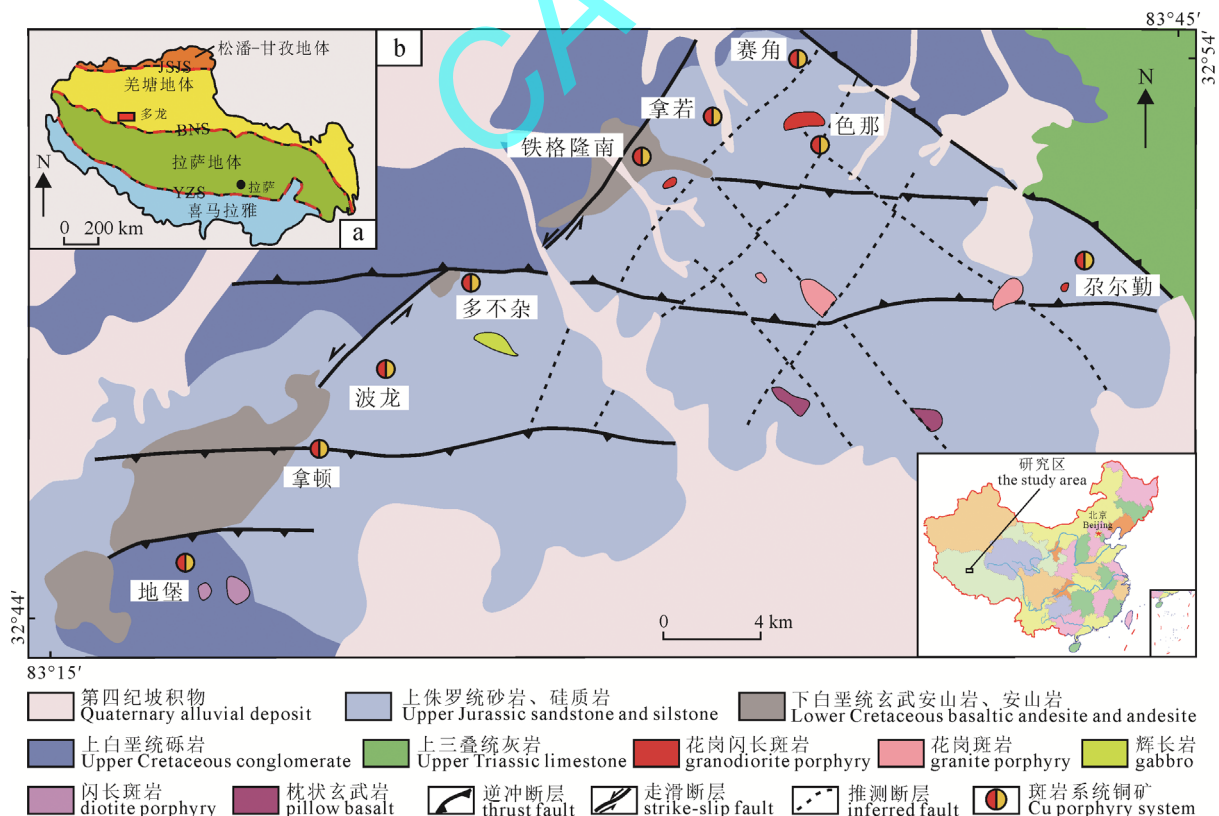
矿集区内出露上三叠统日干配错组(T_3r)灰岩、大理岩; 下侏罗统曲色组(J_1q)长石石英砂岩、粉砂岩夹硅质岩、灰绿色玄武岩、基性火山熔岩、英安岩等; 中一下侏罗统色哇组(J_{1-2s})深灰色、灰色薄层状粉砂岩、中厚层长石石英砂岩、石英砂岩与灰白色薄层状泥质板岩互层; 下白垩统美日切错组(K_1m)斑状石英安山岩、细晶石英安山岩、玄武岩; 新近系康托组(N_1k)砾岩、角砾岩和第四系(Q)残坡积物(图 1)。矿集区内构造发育, 具有多期活动特征。除了发育在中侏罗统地层的少量辉长岩、辉绿岩及枕状玄武岩外, 区内岩浆岩主要为早白垩世的花岗闪长斑岩、闪长斑岩、花岗斑岩、二长花岗斑岩等。

铁格隆南矿床位于多龙矿集区的北部, 矿床内地层主要为中一下侏罗统色哇组(J_{1-2s})由一套长石石英粉砂岩和深灰色泥岩组成的复理石或类复理石沉积; 下白垩统美日切错组(K_1m)由紫红色安山岩、英安岩、玄武岩、火山角砾组成的陆相中基性火山岩建造覆盖在矿体的上部, 对矿体起到保护作用;

上白垩统阿布山组(K_2a)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。侵入岩主要为中酸性早白垩世花岗闪长斑岩和闪长斑岩, 地表可见少量露头(图 2a)。

铁格隆南矿床共圈定 1 个主矿体和 5 个次要矿体。其中主矿体总体呈北东—南西向展布, 北东向长约 1.8 km, 北西向宽约 1.4 km, 向下延伸最厚可达 960 m, 向南东方向缓倾斜。铜资源量大于 1 000 万吨, 平均品位 0.53%, 占矿床资源量的 99% 以上, 伴生金、银资源量也达到大型规模。矿体类型为斑岩-浅成低温热液型。矿体中部 ZK1604、ZK2404、ZK3204、ZK4004 等多个钻孔均未穿透矿体, 矿石品位未降低, 矿体向深部延伸之势未减, 深部还存在较大的找矿潜力。5 个次要矿体规模较小, 走向近北东向, 长约 400 m, 宽仅 100~200 m, 厚度 50~90 m, 主要呈脉状、透镜状产于主矿体顶部, 位于 24~64 号勘查线之间, 受小规模的花岗闪长斑岩岩脉及破裂裂隙控制。

矿石矿物主要以浸染状、细脉浸染状为主, 主要矿石类型包括黄铁矿-黄铜矿矿石、黄铁矿-斑铜矿-硫砷铜矿-蓝辉铜矿-砷黝铜矿-铜蓝矿石、黄铜矿-斑铜矿-铜蓝+黄铁矿矿石。主要金属矿物包括黄铁矿、斑铜矿、硫砷铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、黄铜矿



JSJS—金沙江缝合带; BNS—班公湖—怒江缝合带; YZS—雅鲁藏布缝合带。

JSJS—Jinshajiang suture; BNS—Bangongco—Nujiang suture; YZS—Yarlung Zangbo Suture.

图 1 多龙矿集区大地构造位置图(a)与区域地质图(b)

Fig. 1 Geotectonic location (a) and regional geological map (b) of Duolong ore district

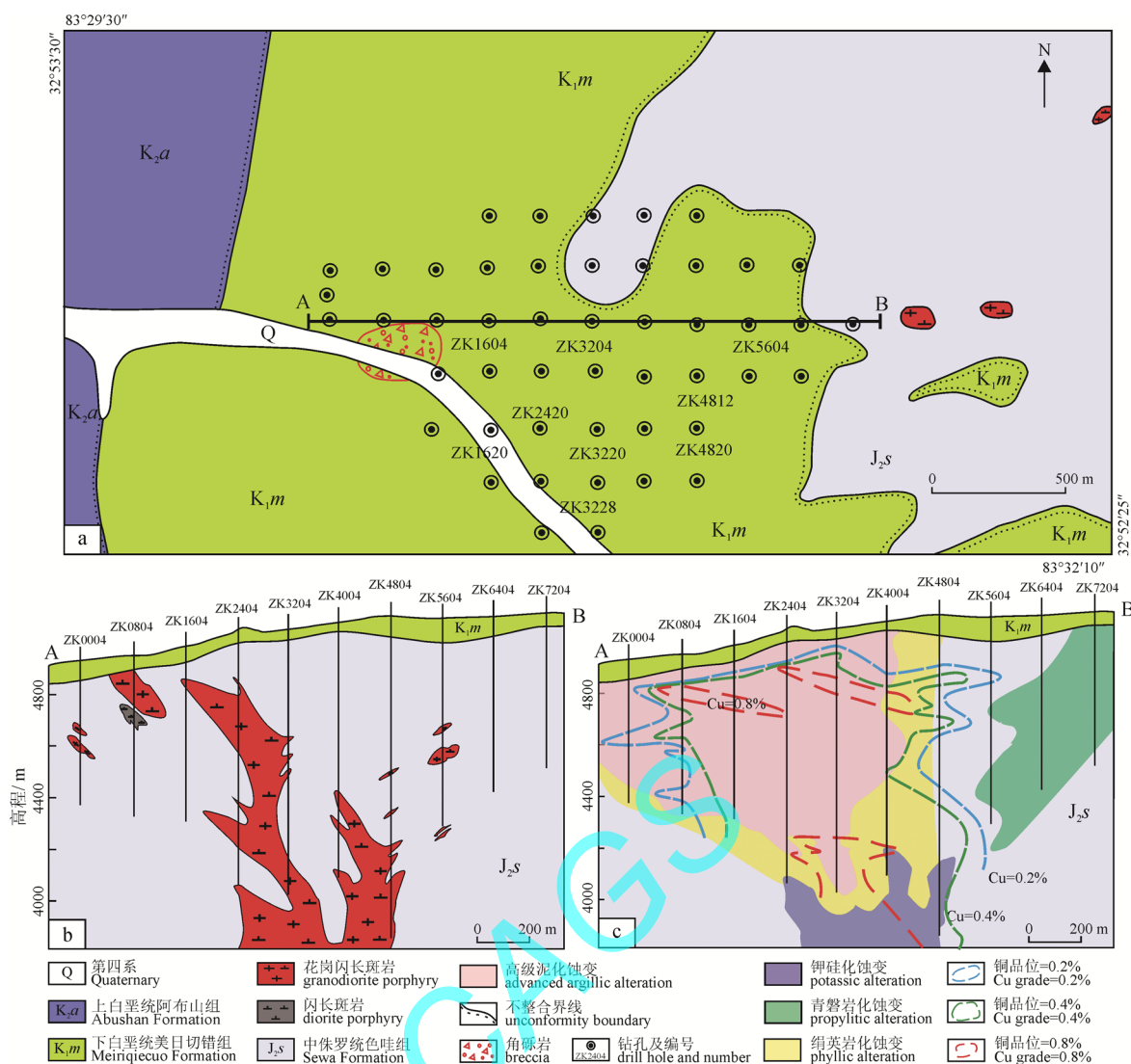


图2 铁格隆南矿区地质图(a)及东西向剖面图(b, c)(林彬等, 2018)

Fig. 2 Geological map of the Tiegelongnan deposit (a) and WE section(b, c) (LIN et al., 2018)

等;次要金属矿物可见方铅矿、闪锌矿、自然铜、磁铁矿等(唐菊兴等, 2014a);脉石矿物主要有明矾石、地开石、高岭石、石英、绢云母、硬石膏、黑云母等;副矿物主要有金红石、磷灰石、锆石、榍石等。蚀变类型主要有高级泥化带产于矿体的上部,主要矿物为高岭石、明矾石、地开石、石英;黄铁绢英岩化带产于矿体的深部,主要矿物为石英、斜长石、角闪石、绢云母;青磐岩化带产于矿体边部,主要矿物为绿泥石、绿帘石、方解石等(图 2b, c)(唐菊兴等, 2016; 林彬等, 2018)。矿区脉体较发育,对矿区脉体进行详细的编录,按脉体中所含矿物成分含量大于 50%,主要分为石英脉(图 3A, E)、黄铁矿脉(图 3F)、地开石脉(图 3C)、高岭石脉、明矾石脉(图 3B, D)、赤铁矿脉、石膏脉、辉钼矿脉等。

3 黄铁矿产出特征

矿区黄铁矿非常发育,常与石英、地开石、高岭石、明矾石、石膏等非金属矿物共同产出,与铜

矿化关系密切,多被硫砷铜矿、砷黝铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、斑铜矿、黄铜矿、斯硫铜矿等铜矿物交代形成交代残余结构。矿区内发育的黄铁矿主要以浸染状和脉状两种形式产出。浸染状黄铁矿镜下结构主要为骸晶结构、压碎结构、环带结构等。脉状黄铁矿的脉宽不等,个别脉体宽度可达 20 cm 以上,并可见到多阶段黄铁矿脉相互切穿。根据详细的野外钻孔编录、标本的镜下鉴定以及与矿化的关系总结出 3 类黄铁矿的产出类型(图 4, 图 5)。

1) 黄铁矿-1(Py1)

本世代黄铁矿呈浸染状、脉状产出,颗粒自形-它形,脉体宽度不等。其中自形的黄铁矿颗粒常可识别出晶体形状,以四面体为主,颗粒表面致密;它形黄铁矿内部发育石英、明矾石、地开石、高岭石颗粒,与铜矿化无关(图 4B, G, H; 图 5A, B, G)。

2) 黄铁矿-2(Py2)

本类黄铁矿颗粒呈半自形-它形,多与明矾石、

地开石、高岭石、石英共同产出,且被硫砷铜矿+砷黝铜矿+蓝辉铜矿+铜蓝等铜矿物交代。本类黄铁矿呈两种分布状态:黄铁矿 2-a(图 5E, H, I)和黄铁矿 2-b(图 5E, I)(杨欢欢等, 2016)。

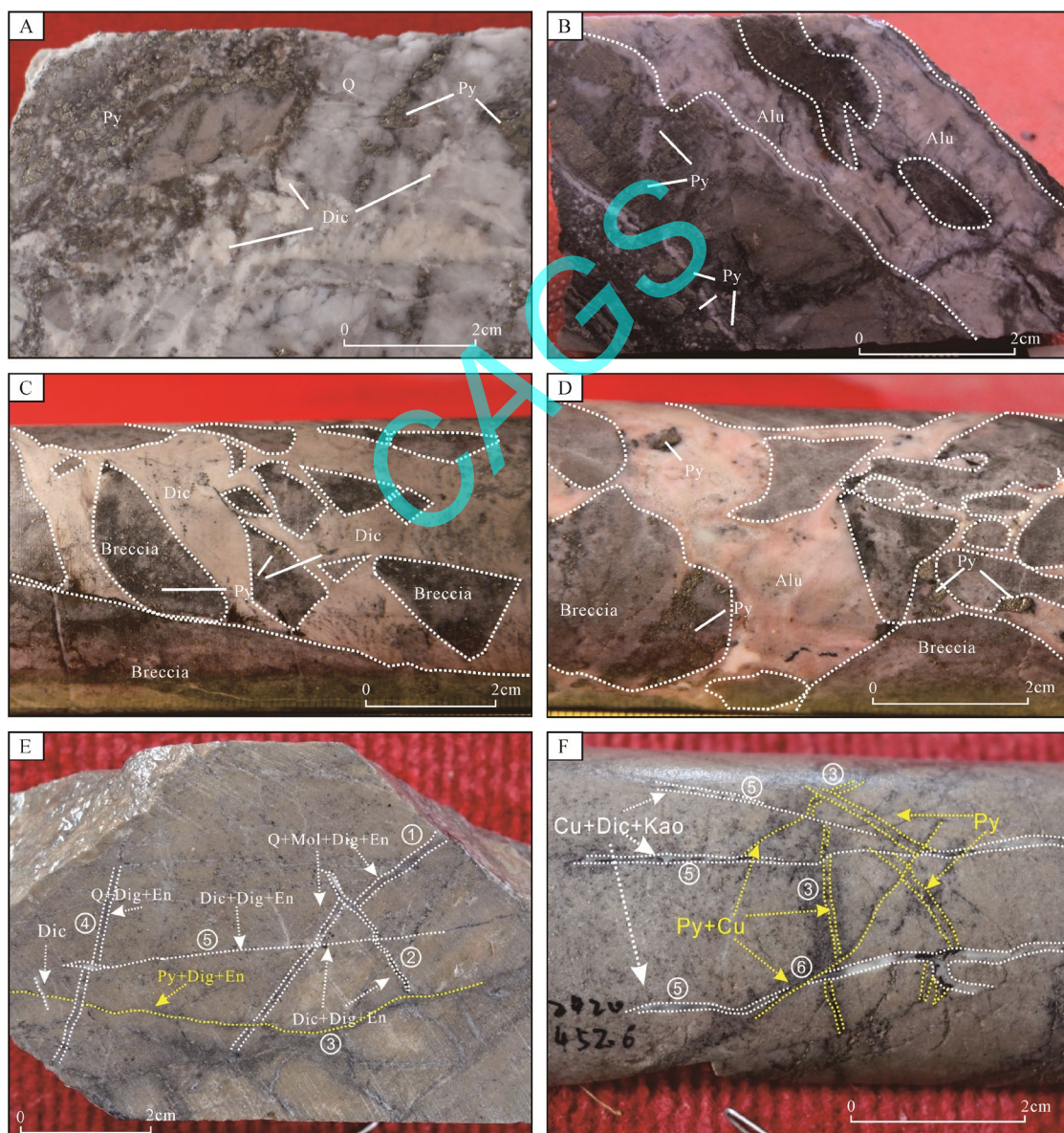
黄铁矿 2-a 形成时期较早,呈粒状产出,颗粒自形-它形。其中自形的黄铁矿颗粒常可识别出晶体形状,如四面体、八面体、五角十二面体及它们的聚形,并且颗粒表面致密,颗粒内发育石英、明矾石、粘土矿物颗粒;而半自形-它形黄铁矿颗粒辨别不出晶体形状,颗粒表面发育溶蚀孔(图 4F),可见发育完整的环带状黄铁矿。该类黄铁矿常因应力作用而发生破碎,而破碎的黄铁矿颗粒常被蓝辉铜矿、斑铜矿、铜蓝、砷黝铜矿等交代。

黄铁矿 2-b 形成时间晚于黄铁矿 2-a,两者之间

可见明显的界线,本世代黄铁矿呈两种分布状态:1)呈细粒结构充填在黄铁矿 2-a 颗粒的粒间,粒径明显小于黄铁矿 2-a,且结晶不好,难见自形晶,其内部疏松多孔,充填石英、明矾石等,可见被蓝辉铜矿交代;2)因次生加大作用发育在黄铁矿 2-a 颗粒的边缘,颗粒呈他形,表面较致密,被黄铜矿、砷黝铜矿交代。

3)黄铁矿-3(Py3)

黄铁矿-3 在手标本上亦呈细脉-浸染状产出在斑岩侵入体中,被蓝辉铜矿、硫砷铜矿、铜蓝、砷黝铜矿、黄铜矿等铜矿物交代。显微镜下该类黄铁矿晶型主要为半自形-它形晶,发育孔洞和裂隙,颗粒边缘可见细小含铜硫化物颗粒(图 4E; 图 5C, D)。



Py—黄铁矿; Q—石英; Alu—明矾石; Breccia—角砾; Dig—蓝辉铜矿; En—硫砷铜矿; Mol—辉钼矿;

Kao—高岭石; Cu—铜硫化物; Dic—地开石。

Kao—pyrite; Q—quartz; Alu—alunite; Dig—digenite; En—enargite; Mol—molybdenite; Kao—kaolinite; Cu—copper sulfide; Dic—dickite.

图 3 铁格隆南矿区矿物特征及脉体特征

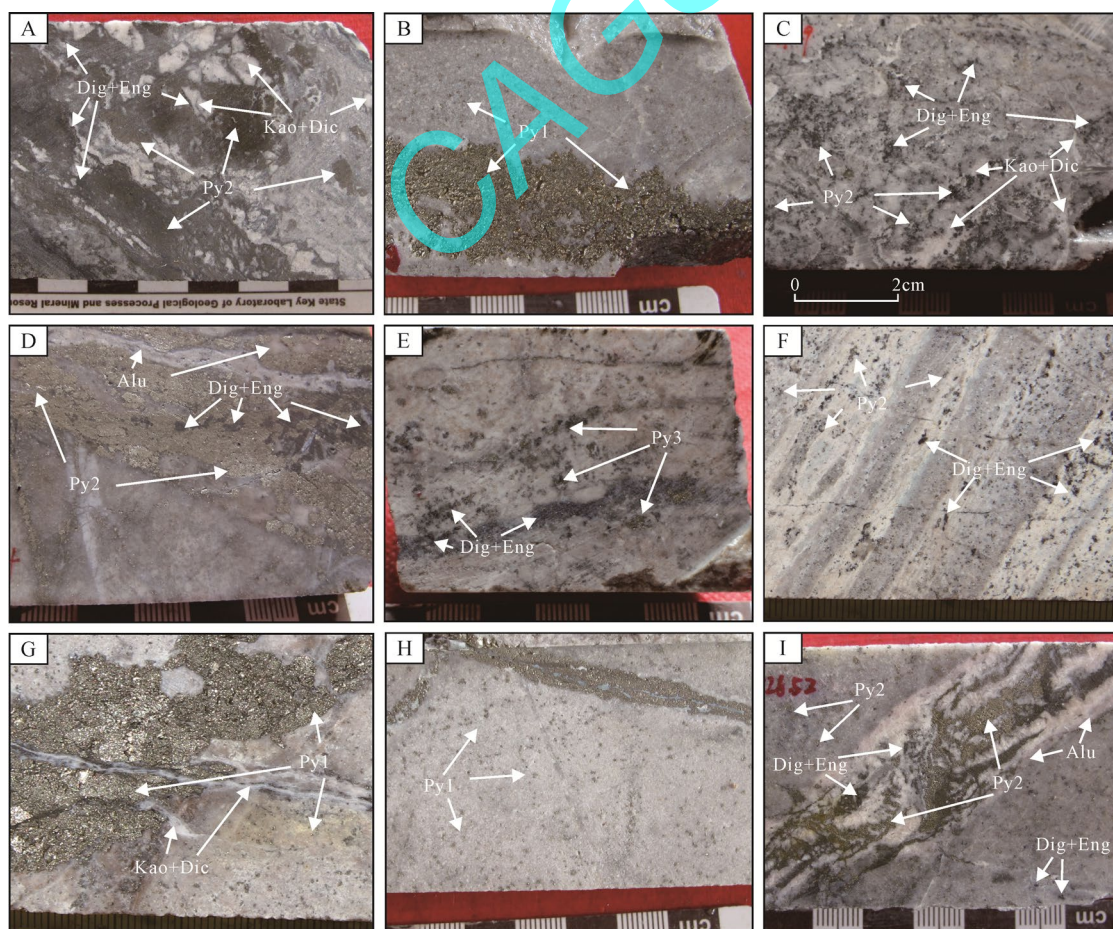
Fig. 3 Characteristic of the minerals and veins in the Tiegelongnan deposit

铁格隆南矿床上部为高硫型浅成低温热液矿体,下部叠加斑岩型矿体,黄铁矿的分布特征在此方面亦表现出一定的差异性(图6)。对铁格隆南矿床04排钻孔内的黄铁矿进行详细的编录可知,黄铁矿分布特征在深部至浅部有所区别。发育在900 m以上的黄铁矿主要以脉体形式产出,少量浸染状产出,矿物组合主要为黄铁矿+明矾石+铜矿化脉、黄铁矿+明矾石+地开石+石英脉、黄铁矿+明矾石+地开石±石英+铜矿化脉、浸染状黄铁矿+铜矿化以及浸染状黄铁矿,900 m以下黄铁矿主要以细脉状(<1 cm)、浸染状产出,矿物组合主要为黄铁矿+石英+黑云母±辉钼矿细脉、黄铁矿+黑云母细脉、浸染状黄铁矿+铜矿化以及浸染状黄铁矿的形式产出。矿床深部辉钼矿、石英较上部发育,浸染状黄铁矿自始至终贯穿整个矿床。除此之外,黄铁矿脉分布在横向上也表现出一定的规律(图6),由ZK1604向东至ZK4804钻孔内黄铁矿脉脉体宽度表现出依次变小的趋势,ZK1604在230—250 m之间的脉状黄铁矿宽度大于20 cm,最宽可达27 cm,250—590 m之间的脉状黄铁矿宽度达到10~20 cm,600—640 m之间的脉状黄铁矿宽度可达到4~8 cm,645—680 m之间

的黄铁矿脉宽度为2 cm,680 m以下以浸染状黄铁矿为主;ZK2404在450—620 m之间的脉状黄铁矿宽度可达10~20 cm,在220—400 m和650—860 m之间的黄铁矿脉宽为4~8 cm;ZK3204在280 m处黄铁矿脉宽可达20 cm,而在250—280 m和280—590 m之间的脉状黄铁矿宽度为4~8 cm;ZK4004在490 m处黄铁矿脉宽可达7.5 cm;而ZK4804在820—960 m之间的黄铁矿脉宽为2~3 cm,该钻孔其他深度黄铁矿以细脉浸染状为主。

4 样品制备和实验分析

在铁格隆南矿床04排钻孔的不同深度采取31件黄铁矿样品用于挑选纯净的黄铁矿单矿物样品,将5 mg以上的纯净的黄铁矿样品送实验室分析,其中10个样品进行黄铁矿硫同位素分析,24个样品进行黄铁矿单矿物微量元素分析。黄铁矿单矿物微量元素测试分析是在国家地质实验测试中心和中铁物探勘查有限公司完成,分析方法见文献杨欢欢等(2016)。黄铁矿单矿物硫同位素分析是在核工业北京地质研究院完成,分析方法见文献Lin et al.(2017)。



Py1—黄铁矿-1; Py2—黄铁矿-2; Py3—黄铁矿-3; Alu—明矾石; Dig+Eng—蓝辉铜矿+硫砷铜矿; Kao+Dic—高岭石+地开石。

Py1—pyrite-1; Py2—pyrite-2; Py3—pyrite-3; Alu—alunite; Dig+Eng—digenite+enargite; Kao+Dic—kaolinite+dickite.

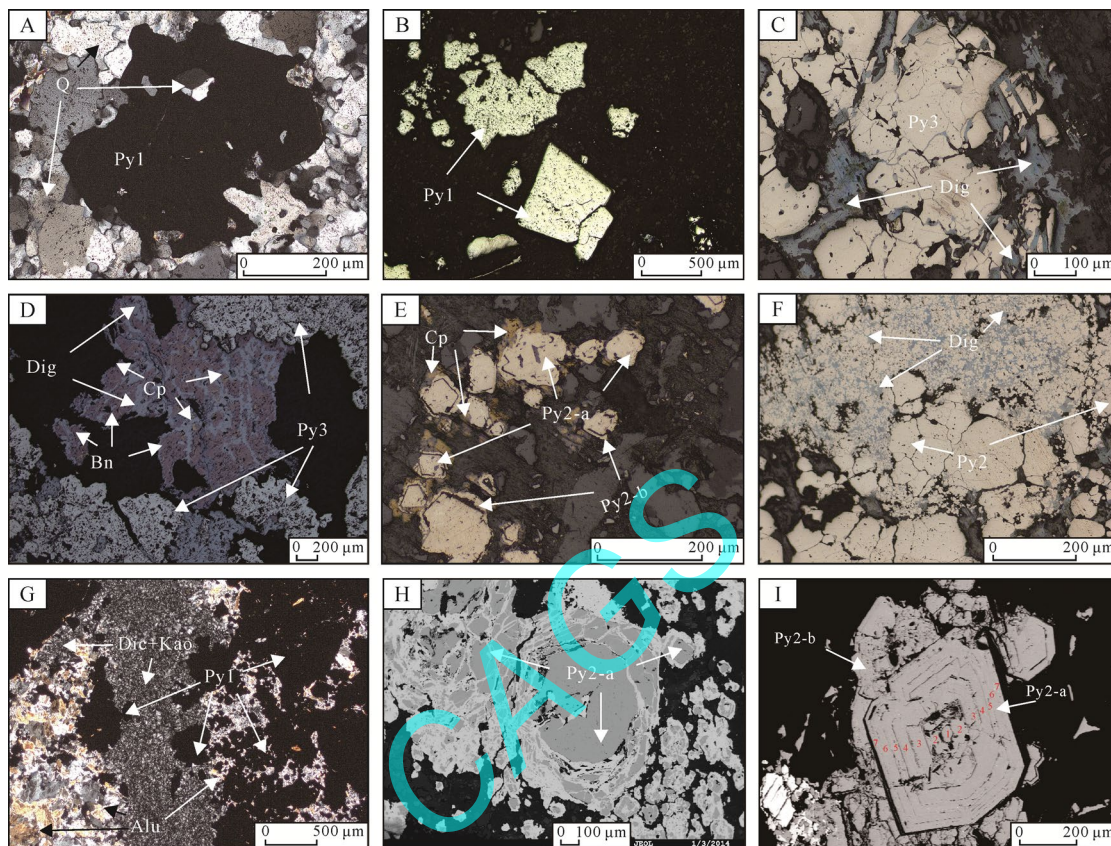
图4 铁格隆南矿床三类黄铁矿手标本照片

Fig. 4 Photos of the three types of pyrite in the Tiegelongnan deposit

4.1 微量元素分析方法

样品微量元素测试分析在国家地质实验测试中心完成,使用仪器为Thermo Element-II等离子质谱仪,激光剥蚀系统为New Wave UP-213。实验采用He作为剥蚀物质的载气,激光波长213 nm、束斑40 μm 、脉冲频率10 Hz、能量0.176 mJ、密度23~25 J/m²。测试过程中首先遮挡激光束进行空白

背景采集15 s,然后进行样品连续剥蚀采集45 s,停止剥蚀后继续吹扫15 s清洗进样系统,单点测试分析时间75 s。等离子质谱测试参数为冷却气流速(Ar)15.55 L/min;辅助气流速(Ar)0.67 L/min;载气流速(He)0.58 L/min;样品气流速0.819 L/min,射频发生器功率1205 W。测试数据采用外标法,标样使用NIST-612,MASS-1。



Py1—黄铁矿-1; Py2—黄铁矿-2; Py3—黄铁矿-3; Q—石英; Alu—明矾石; Cp—黄铜矿; Dig—蓝辉铜矿; Bn—斑铜矿;
Py2-a—黄铁矿 2-a; Py2-b—黄铁矿 2-b; Kao+Dic—高岭石+地开石。

Py1—pyrite-1; Py2—pyrite-2; Py3—pyrite-3; Q—quartz; Alu—alunite; Cp—chalcopyrite; Dig—digenite; Bn—bornite;
Py2-a—pyrite 2-a; Py2-b—pyrite 2-b; Kao+Dic—kaolinite+dickite.

图5 铁格隆南矿床黄铁矿镜下照片及背散射照片

Fig. 5 Microscopic and backscattering images of pyrite in the Tiegelongnan deposit

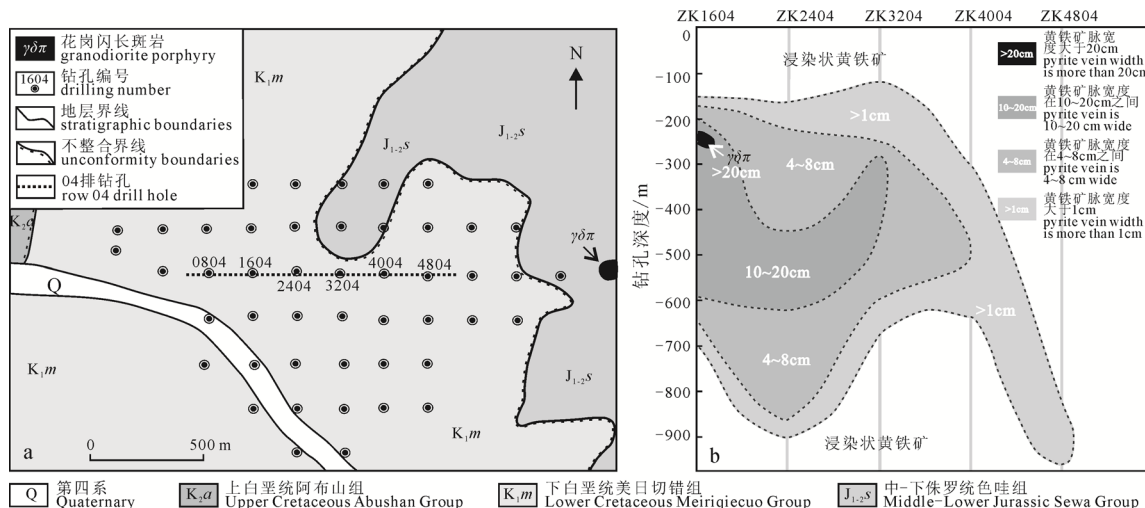


图6 铁格隆南矿床钻孔布置图(a)及04排钻孔黄铁矿脉体宽度随深度变化图(b)

Fig. 6 Drill hole position (a) and pyrite vein change according to depth (b) in the Tiegelongnan deposit

4.2 硫同位素分析方法

样品硫同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成, 进行硫同位素分析的样品首先粉碎, 然后在双目镜下挑选提纯, 使之纯度达 99% 以上。硫同位素组成的测定流程为: 以 CuO 和 V_2O_5 作为混合氧化剂, 在高温、真空条件下, 与测试矿物反应制取 SO_2 。所用仪器为 MAT 251EM, 以 V_CDT 为标准, 测试精度为 0.2‰。

5 实验结果

5.1 黄铁矿微量元素特征

铁格隆南矿床黄铁矿的微量元素分析结果如表 1 所示。黄铁矿-1 的 Au 元素含量平均值为 104.33×10^{-9} , Ag 元素含量平均值为 0.63×10^{-6} , As 元素含量平均值为 26.86×10^{-6} , Co 元素含量平均值为 400.67×10^{-6} , Ni 元素含量平均值为 260.92×10^{-6} , Cu 元素含量平均值为 $1\,041.75 \times 10^{-6}$, Se 元素含量平均值为 39.56×10^{-6} , Te 元素含量平均值为 1.14×10^{-6} ; 黄铁矿-2 的 Au 元素含量平均值为 689×10^{-9} , Ag 元素含量平均值为 3.16×10^{-6} , As 元素含量平均值为 $1\,721.18 \times 10^{-6}$, Co 元素含量平均值为 244.57×10^{-6} , Ni 元素含量平均值为 259.86×10^{-6} , Cu 元素含量平均值为 $8\,375.71 \times 10^{-6}$, Se 元素含量平均值为 32.75×10^{-6} , Te 元素含量平均值为 4.16×10^{-6} ; 黄铁矿-3 的 Au 元素含量平均值为 118.6×10^{-9} , Ag 元素含量平均值为 1.48×10^{-6} , As 元素含量平均值为 26.64×10^{-6} , Co 元素含量平均值为 98.6×10^{-6} , Ni 元素含量平均值为 74.4×10^{-6} , Cu 元素含量平均值为 $3\,364.8 \times 10^{-6}$, Se 元素含量平均值为 73.3×10^{-6} , Te 元素含量平均值为 1.25×10^{-6} 。

5.2 黄铁矿稀土元素特征

铁格隆南矿床黄铁矿稀土元素结果如表 2 所示。不同深度黄铁矿 ΣREE 值在 $(2.71 \sim 42.99) \times 10^{-6}$ 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值在 3.01~20.8 之间, LREE/HREE 比

值为 2.85~18.54。黄铁矿-1 的稀土总量为 $(4.63 \sim 42.99) \times 10^{-6}$, LREE 为 $(3.83 \sim 36.28) \times 10^{-6}$, HREE 为 $(0.32 \sim 6.71) \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 2.85~15.61, 轻稀土富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 3.01~17.93, δEu 值为 0.47~1.29, δCe 值为 0.88~0.94; 黄铁矿-2 的稀土总量为 $(2.71 \sim 17.34) \times 10^{-6}$, LREE 为 $(2.32 \sim 15.4) \times 10^{-6}$, HREE 为 $(0.36 \sim 1.94) \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 5.72~18.54, 轻稀土富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 4.41~20.8, δEu 值为 0.65~1.68, δCe 值为 0.89~0.95; 黄铁矿-3 的稀土总量为 $(4.15 \sim 20.53) \times 10^{-6}$, LREE 为 $(3.54 \sim 18.97) \times 10^{-6}$, HREE 为 $(0.61 \sim 1.78) \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 5.8~12.2, 轻稀土富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 6.96~12.52, δEu 值为 0.62~1.08, δCe 值为 0.87~0.94。其中黄铁矿-1 的稀土总量最大, 轻重稀土分异程度和铕异常介于黄铁矿-2 和黄铁矿-3 之间; 黄铁矿-2 的稀土总量最小, 铕异常和轻重稀土分异程度最强, 黄铁矿-1 稀土元素标准化曲线趋势不同于黄铁矿-2 和黄铁矿-3(图 7)。

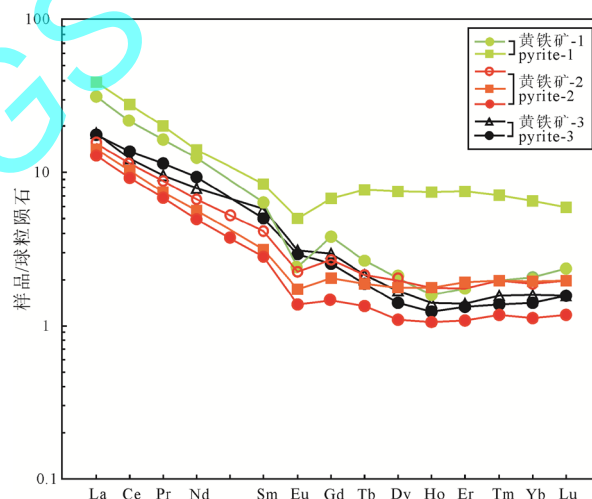


图 7 三类黄铁矿球粒陨石标准化稀土元素配分曲线
Fig. 7 Standardized rare earth element distribution curves for three types of pyrite chondrites

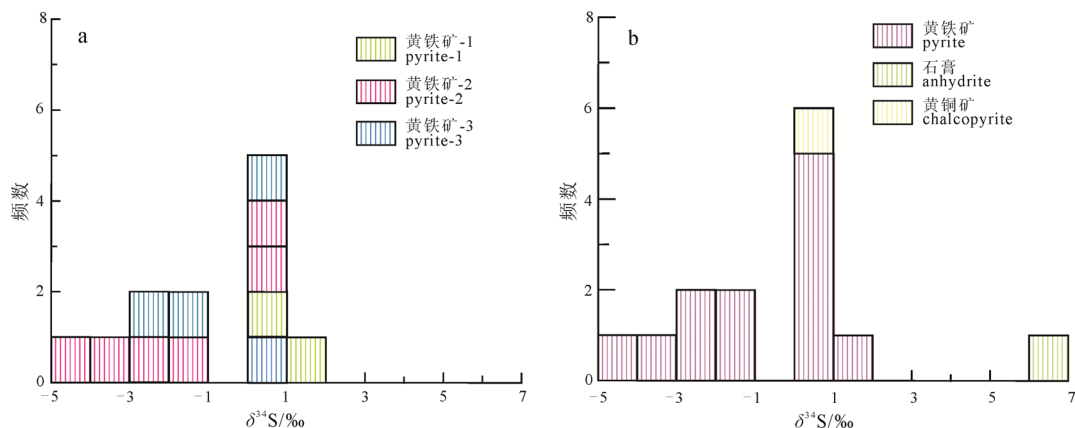


图 8 铁格隆南矿床不同类型黄铁矿(a)和不同矿物(b)硫同位素组成直方图

Fig. 8 Sulfur isotopic composition histogram of different types of pyrite (a) and different minerals (b) in the Tiegelongnan deposit

表 1 铁格隆南矿床黄铁矿微量元素含量
Table 1 Trace elements of pyrite in the Tiegelongnan deposit

黄铁矿类型	样品编号	Au /10 ⁻⁹	Ag /10 ⁻⁶	As /10 ⁻⁶	Co /10 ⁻⁶	Ni /10 ⁻⁶	Cu /10 ⁻⁶	Zn /10 ⁻⁶	Sb /10 ⁻⁶	Pb /10 ⁻⁶	Bi /10 ⁻⁶	Se /10 ⁻⁶	Te /10 ⁻⁶	Rb /10 ⁻⁶	Sr /10 ⁻⁶	Zr /10 ⁻⁶	Hf /10 ⁻⁶
Py1	ZK0804-298	N	0.49	N	286	257	1 028	42.4	2.08	9.4	3.14	19.4	0.74	N	12.00	23.8	0.76
Py1	ZK0804-328	N	0.66	N	197	147	1 795	85.0	0.99	24.4	2.52	15.1	1.59	N	8.91	5.1	0.17
Py1	ZK0804-441	N	1.10	51.7	383	555	1 788	63.1	2.25	43.6	3.00	20.1	1.54	N	8.32	7.4	0.22
Py1	ZK3204-573	N	0.56	N	74	203	1 153	27.4	2.17	4.6	3.63	13.4	0.83	0.70	2.92	16.1	0.50
Py1	ZK3204-697	N	0.67	N	110	150	856	115.0	1.04	14.1	2.68	15.6	1.17	0.27	4.90	8.8	0.28
Py1	ZK3204-791	N	0.24	N	113	229	338	39.1	0.23	2.4	0.70	12.2	0.55	1.19	2.24	11.3	0.37
Py1	ZK3204-860	N	0.26	N	276	284	657	32.3	0.37	5.3	0.79	14.1	1.24	0.99	2.18	8.5	0.29
Py1	ZK2404-555	74	0.32	56.2	140	573	755	5.5	3.73	1.3	1.13	44.6	0.45	0.44	2.55	1.6	0.17
Py1	ZK4004-591	N	0.20	N	421	310	223	32.4	0.69	2.1	0.77	12.8	0.88	0.98	3.35	29.0	0.88
Py1	ZK2404-370	182	0.35	12.2	99	106	985	6.0	0.28	4.4	1.57	107.2	3.03	0.07	2.23	1.5	0.13
Py1	ZK4004-891	N	0.68	10.2	143	122	1 829	37.3	0.76	6.3	1.22	12.5	0.91	0.24	2.42	9.1	0.29
Py1	ZK4804-1138	57	2.04	4.0	2 566	195	1 094	5.6	0.30	5.7	5.36	187.7	0.76	0.05	0.79	1.8	0.19
Py2	ZK0804-212	N	1.19	8.8	180	65	7 571	38.7	1.33	14.5	4.68	27.4	3.07	N	7.46	2.1	0.08
Py2	ZK2404-567	118	0.81	26.3	80	441	2 927	7.2	1.58	3.6	1.79	89.3	0.35	0.17	2.91	1.6	0.17
Py2	ZK2404-568	N	2.66	N	94	162	7 023	N	N	N	N	N	N	0.37	45.00	5.5	0.23
Py2	ZK3204-473	1 260	13.16	8 176.8	82	104	26 385	149.8	230.69	180.7	47.96	36.8	17.53	0.07	4.37	2.6	0.15
Py2	ZK4004-627	N	0.97	228.0	79	275	2 906	103.0	14.80	24.8	4.43	13.4	1.33	1.13	90.70	24.9	0.76
Py2	ZK4004-766	N	2.63	N	465	522	9 768	38.8	4.11	7.1	5.72	13.8	1.72	1.03	4.51	19.7	0.66
Py2	ZK3204-1042	N	0.67	166.0	732	250	2 050	116.0	11.20	24.8	2.48	15.8	0.93	N	15.60	20.7	0.59
Py3	ZK4804-961	47	1.65	13.6	12	36	6 636	6.2	1.03	1.9	0.71	2.1	0.12	0.05	0.67	1.5	0.13
Py3	ZK2404-170	67	1.33	16.4	161	117	3 147	6.3	1.47	45.5	1.14	71.4	1.17	0.06	7.86	6.9	0.50
Py3	ZK2404-272	89	0.31	5.4	178	74	2 995	7.3	0.41	7.5	1.01	166.3	0.45	0.08	1.80	1.4	0.14
Py3	ZK2404-447	327	1.96	91.1	96	76	2 026	7.5	6.32	21.7	11.66	55.3	3.21	0.07	4.31	2.2	0.22
Py3	ZK4804-1128	63	2.13	6.7	46	69	2 020	9.5	0.89	10.5	19.59	71.4	1.28	0.07	1.14	1.4	0.14

注: N 表示数据低检出限。

表 2 铁格隆南矿床黄铁矿稀土元素含量/ 10^{-6}
Table 2 Rare earth elements of pyrite in the Tiegelongnan deposit / 10^{-6}

样品编号	黄铁矿 类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
0804-328	Py1	1.25	2.33	0.27	0.95	0.13	0.05	0.10	0.020	0.07	0.015	0.05	0.007	0.05	0.007	4.63	3.83	0.80	4.79	3.01	0.90	0.94
0804-441	Py1	1.21	2.17	0.25	0.89	0.14	0.05	0.09	0.015	0.09	0.020	0.05	0.007	0.05	0.007	5.30	4.98	0.32	15.61	17.93	1.29	0.94
3204-573	Py1	2.57	4.80	0.57	2.21	0.54	0.17	0.94	0.180	1.15	0.240	0.64	0.080	0.51	0.070	14.67	10.86	3.81	2.85	3.61	0.72	0.93
3204-697	Py1	1.65	2.95	0.32	1.10	0.21	0.05	0.21	0.035	0.25	0.050	0.14	0.020	0.13	0.020	7.14	6.28	0.86	7.35	9.10	0.72	0.93
3204-860	Py1	1.16	2.07	0.25	0.94	0.21	0.05	0.20	0.030	0.20	0.050	0.14	0.020	0.14	0.020	5.48	4.68	0.80	5.85	5.94	0.73	0.90
2404-555	Py1	7.46	13.21	1.55	5.82	0.98	0.14	0.78	0.100	0.52	0.090	0.29	0.050	0.35	0.060	31.40	29.16	2.24	13.02	15.29	0.47	0.90
2404-370	Py1	2.22	4.30	0.63	2.84	0.58	0.12	0.30	0.050	0.22	0.050	0.14	0.025	0.13	0.020	11.61	10.70	0.92	11.68	12.25	0.79	0.88
4004-891	Py1	9.21	17.00	1.92	6.57	1.29	0.29	1.39	0.290	1.92	0.420	1.25	0.180	1.11	0.150	42.99	36.28	6.71	5.41	5.95	0.66	0.94
0804-212	Py2	0.59	1.04	0.12	0.43	0.09	0.05	0.09	0.015	0.10	0.020	0.07	0.010	0.07	0.010	2.71	2.32	0.39	6.03	6.05	1.68	0.91
2404-568	Py2	0.86	1.53	0.19	0.70	0.15	0.03	0.12	0.020	0.15	0.035	0.10	0.020	0.14	0.020	4.07	3.46	0.61	5.72	4.41	0.66	0.89
2404-567	Py2	1.45	2.99	0.41	1.51	0.19	0.05	0.13	0.015	0.08	0.017	0.05	0.007	0.05	0.007	6.96	6.60	0.36	18.54	20.80	0.92	0.94
4004-627	Py2	3.65	7.01	0.84	3.14	0.63	0.13	0.55	0.080	0.50	0.100	0.29	0.050	0.32	0.050	17.34	15.40	1.94	7.94	8.18	0.66	0.94
4004-766	Py2	3.35	6.28	0.71	2.65	0.48	0.10	0.42	0.070	0.45	0.100	0.32	0.050	0.33	0.050	15.36	13.57	1.79	7.58	7.28	0.67	0.95
3204-1042	Py2	3.07	5.66	0.65	2.32	0.43	0.08	0.30	0.050	0.28	0.060	0.18	0.030	0.19	0.030	13.33	12.21	1.12	10.90	11.59	0.65	0.93
2404-170	Py3	4.27	7.57	0.91	3.69	0.89	0.18	0.61	0.080	0.43	0.080	0.23	0.047	0.27	0.040	19.29	17.51	1.78	9.84	11.34	0.71	0.90
2404-272	Py3	0.97	1.56	0.17	0.65	0.14	0.05	0.14	0.050	0.17	0.040	0.11	0.015	0.10	0.015	4.15	3.54	0.61	5.80	6.96	1.08	0.87
2404-447	Py3	4.19	8.41	1.09	4.34	0.77	0.17	0.52	0.070	0.36	0.070	0.22	0.035	0.24	0.040	20.53	18.97	1.56	12.20	12.52	0.78	0.94
3204-791	Py3	2.68	4.99	0.58	2.17	0.41	0.08	0.37	0.060	0.34	0.070	0.21	0.030	0.20	0.030	12.22	10.91	1.31	8.33	9.61	0.62	0.94

5.3 黄铁矿硫同位素特征

对铁格隆南矿床的 10 件黄铁矿样品进行硫同位素分析(表 3), 其中 2 件样品为黄铁矿-1, 5 件样品为黄铁矿-2, 3 件样品为黄铁矿-3。铁格隆南黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围较小, 为 $-4.5\text{‰} \sim 1.9\text{‰}$, 平均值约为 -1.0‰ (图 8a), 黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.2‰ , 石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 6.8‰ (图 8b)。铁格隆南矿床的三类黄铁矿的硫同位素呈现出明显不同的特征: 黄铁矿-1 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值最大为 1.9‰ ; 黄铁矿-2 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-4.5\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$, 平均值为 -1.9‰ ; 黄铁矿-3 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-2.2\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$, 平均值为 -0.8‰ 。

6 讨论

6.1 黄铁矿地球化学特征

对铁格隆南矿床中黄铁矿内的 Cu、Ag、Pb、Zn 元素进行投图(图 9), 黄铁矿-2 内的 Ag 和 Cu、Pb 和 Zn、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb 均呈现出明显的正相关性, 其中 Ag 和 Cu 相关系数为 0.97, Pb 和 Zn 相关系数为 0.75, Cu 和 Pb 相关系数为 0.90, Ag 和 Pb 相关系数为 0.95; 黄铁矿-3 内 Ag 和 Cu、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb、Pb 和 Zn 均未呈现出明显的相关性。黄铁矿内其他微量元素投图(图 9)显示, 黄铁矿-2 中 Pb 和 Bi、Bi 和 Sb、As 和 Sb 均呈现出明显的正相关性, 其中 Pb 和 Bi 相关系数为 0.99, Bi 和 Sb 相关系数为 0.99, As 和 Sb 相关系数为 0.99, 而 Cu 和 Ni、Se 和 Te、Zn 和 Se、Bi 和 Se、As 和 Se 未表现出明显的相关性; 黄铁矿-3 内的 As 和 Sb 呈现出较好的

正相关性, 相关系数为 0.99, 而 Cu 和 Ni 呈现出较好的负相关性, 其中 Cu 和 Ni 相关系数为 -0.59 , As 和 Se、Zn 和 Se、Bi 和 Pb、Bi 和 Sb、Bi 和 Se、Se 和 Te 未表现出明显的相关性。

铁格隆南矿床内黄铁矿的 Se、Te、Zr、Co 元素含量在 1000 m 深度时均表现出不同的变化特征(图 10)。Te 元素在 170—861 m 深度含量范围为 $(0.35 \sim 17.53) \times 10^{-6}$, 在 861 m 深度含量变化范围增大, 为 $(0.12 \sim 1.28) \times 10^{-6}$ (图 10a)。Co 元素在 170—861 m 深度含量变化宽度较小, 为 $(74.1 \sim 465) \times 10^{-6}$, 平均值为 179.89×10^{-6} ; 在 861—1139 m 深度变化宽度增大, 为 $(12.48 \sim 2566) \times 10^{-6}$, 平均值为 629.18×10^{-6} (图 10b)。Se 元素呈现出三种不同的变化特征: 在 170—568 m 变化宽度相对较大, 为 $(15.1 \sim 166.25) \times 10^{-6}$, 平均值为 59.35×10^{-6} ; 在 573—861 m 变化宽度变小, 为 $(12.2 \sim 15.6) \times 10^{-6}$, 平均值为 13.61×10^{-6} ; 在 861—1139 m 变化宽度增大, 为 $(2.14 \sim 187.73) \times 10^{-6}$, 平均值为 57.9×10^{-6} (图 10c)。Zr 元素在 170—591 m 深度含量变化宽度较大, 为 $(1.4 \sim 29) \times 10^{-6}$, 平均值为 7.63×10^{-6} ; 在 627—861 m 深度含量变化宽度变小, 为 $(8.48 \sim 24.9) \times 10^{-6}$, 平均值为 14.64×10^{-6} ; 在 891—1139 m 深度含量变化宽度又增大, 为 $(1.36 \sim 20.7) \times 10^{-6}$, 平均值为 6.89×10^{-6} (图 10d)。

铁格隆南矿床的黄铁矿内上述四类微量元素在深部(约 900 m)显示出与浅部不同的分布特征, 可能受到浅部的浅成低温热液型矿化和深部的斑岩型矿化的影响。

表 3 铁格隆南矿床硫同位素分析结果
Table 3 Results of sulfur isotope analysis in the Tiegelongnan deposit

黄铁矿类型	样品编号	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	分析矿物	资料来源
Py1	RN2404-555	1.9	黄铁矿	本文
Py1	RN2405-222	0.1	黄铁矿	本文
Py2	RN4004-1026	0.3	黄铁矿	本文
Py2	RN3204-698	0.2	黄铁矿	本文
Py2	RN2404-568	-3.1	黄铁矿	本文
Py2	RN3204-473	-4.5	黄铁矿	本文
Py2	RN2412-447	-1.9	黄铁矿	本文
Py2	RN1604-377	-2.5	黄铁矿	Lin et al., 2017
Py3	RN4804-1128	0.1	黄铁矿	本文
Py3	RN4804-962	0.9	黄铁矿	本文
Py3	RN2404-709	-2.2	黄铁矿	本文
Py3	RN1604-192	-1.8	黄铁矿	Lin et al., 2017
	RN3220-856	6.8	硬石膏	Lin et al., 2017
	RN3228-487	0.2	黄铜矿	Lin et al., 2017

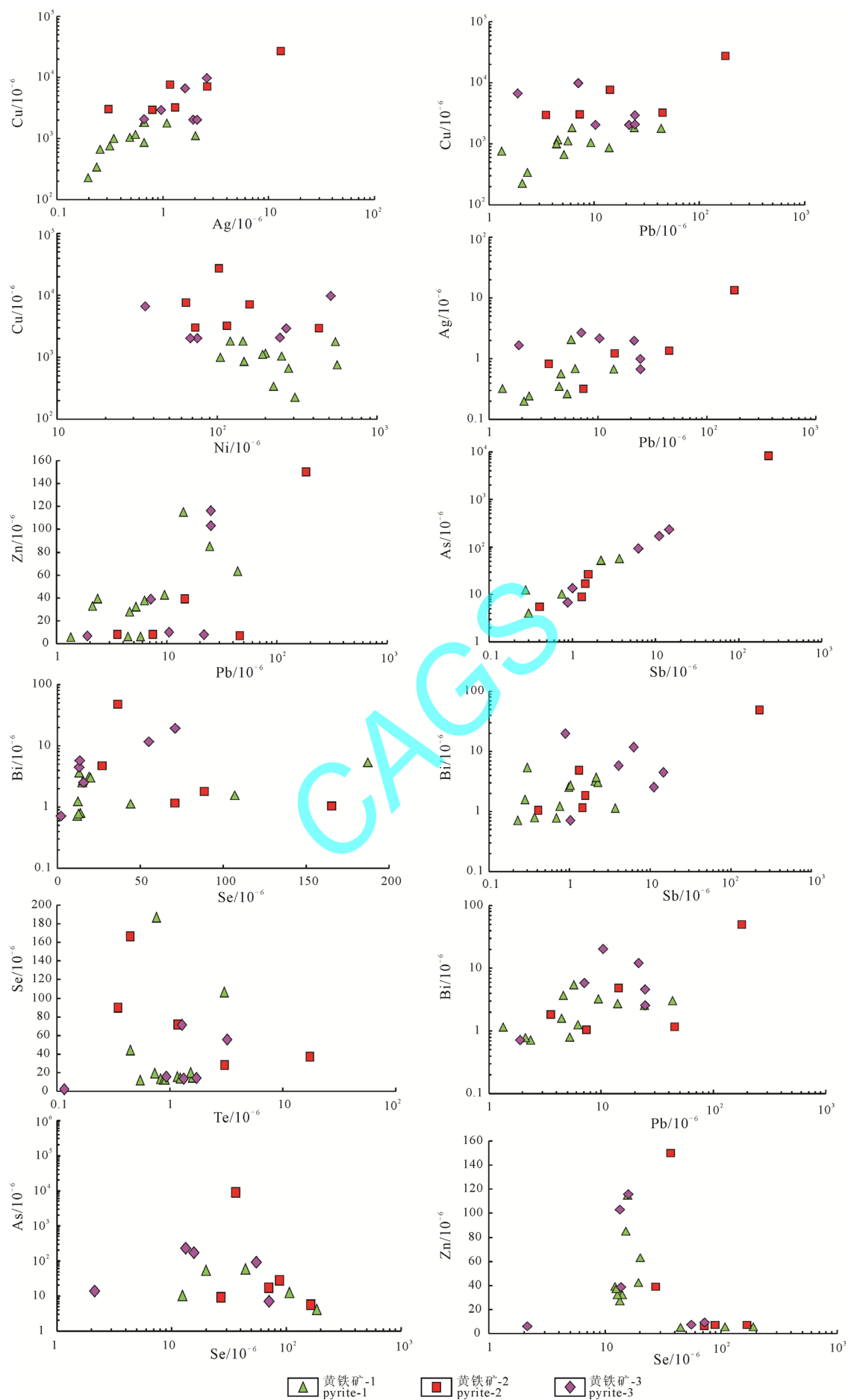


图 9 铁格隆南矿床黄铁矿微量元素散点图

Fig. 9 Scatter plot of trace elements of pyrite in the Tiegelongnan deposit

稀土元素(REE)主要与 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等形成碳酸盐、硫酸盐、氯化物和氟化物络合物(韩吟文等, 2003)。由于 REE 很难类质同象代替黄铁矿中的 Fe^{2+} , 它们在黄铁矿中最可能的位置是存在于流体包裹体或晶体缺陷中。这表明黄铁矿中的 REE 受晶体结构的影响不大, 而应主要受形成黄铁矿之介质的 REE 特征控制(毕献武等, 2004)。黄铁矿单矿物稀土元素组成基本能代表成矿流体的稀土元素组成(李厚民等, 2003; 毕献武等, 2004; 陈懋弘等, 2007), 其所记录的稀土配分模式是该矿物沉淀时与之平衡的流体稀土特征的真实反映。

铁格隆南矿床不同深度黄铁矿均呈现出轻稀土富集, 重稀土亏损的“右倾”式稀土配分模式(图 11), 产于深部(700—1000 m)和浅部(200—450 m)

的黄铁矿的稀土元素特征存在差异, 浅部黄铁矿的轻重稀土分异程度较大, 以正铈异常为主, 而深部黄铁矿轻重稀土分异相对较小, 以负铈异常为主。其中产于 891 m 处黄铁矿的球粒陨石标准化曲线变化趋势与其他深度黄铁矿明显不同, 该曲线呈现出“V”字型, 其 ΣREE 最大为 42.99×10^{-6} , LREE 值最大为 36.28×10^{-6} , HREE 值最大为 6.71×10^{-6} 。铁格隆南矿床多数黄铁矿样品呈现出明显的负铈异常, δEu 为 0.47~1.68, 未见 Ce 异常。铈在还原条件下呈 Eu^{2+} 状态与其他 3 价稀土元素分离, 而铈在还原条件下呈 Ce^{3+} 状态, 只有在氧化条件下才呈 Ce^{4+} 状态与其他稀土元素分离。因此, 黄铁矿的稀土元素具明显铈负异常、而铈无明显异常表明其成矿物理化学条件为还原环境。

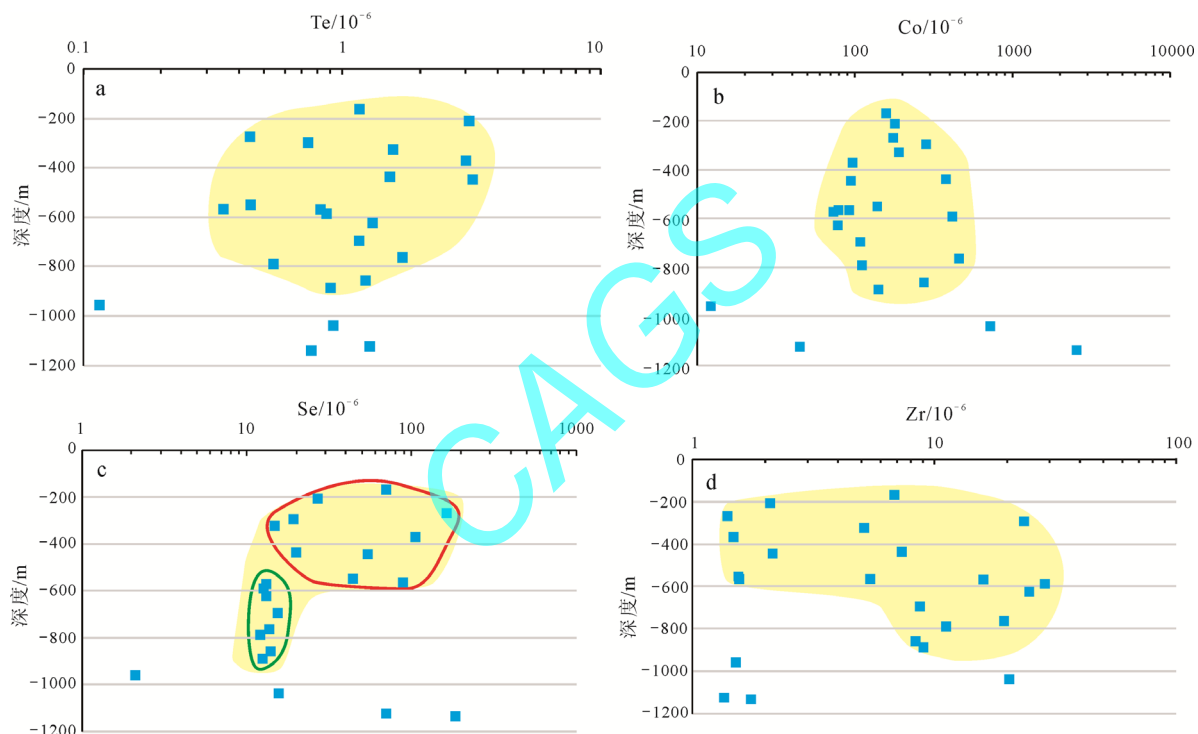


图 10 铁格隆南矿床黄铁矿微量元素随深度变化图

Fig. 10 Change of trace elements in pyrite according to depth in the Tiegelongnan deposit

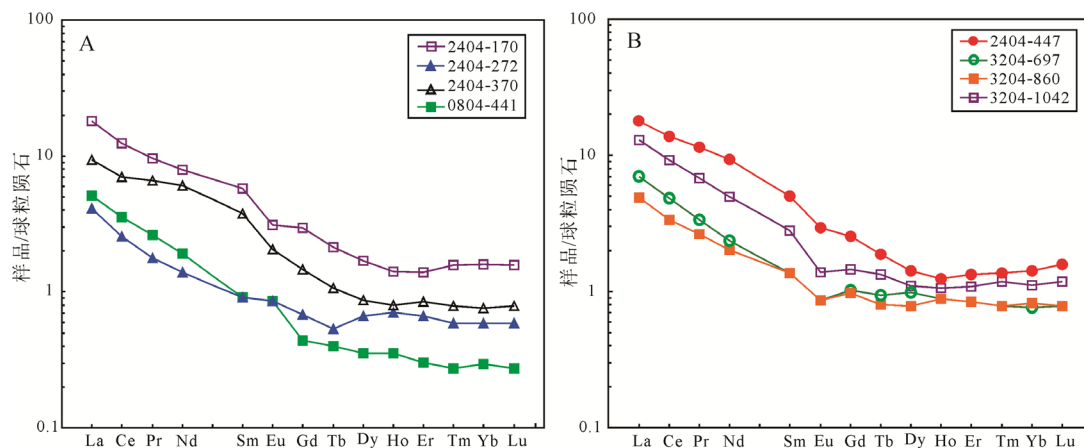


图 11 铁格隆南矿床黄铁矿球粒陨石标准化稀土元素配分曲线

Fig. 11 Standardized rare earth element distribution curves of pyrite chondrites in the Tiegelongnan deposit

铁格隆南矿床 960 m 以下深度黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为正值, 明显高于浅部黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 即深部黄铁矿相对富集 ^{34}S 。将铁格隆南矿床黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 与深度结合显示出三个变化阶段: 200—500 m 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.5\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$, 呈现出随深度增加而减小的趋势; 500—960 m 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-3.1\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$, 呈现出随深度增加而增大的趋势; 960—1100 m 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.1\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$, 均大于 0, 且随深度增加逐渐减小。不同含硫物质富集 $\delta^{34}\text{S}$ 的能力不同, 为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{SO}_3^{2-} > \text{SO}_2 > \text{SCO} > \text{Sx-H}_2\text{S-HS}^- > \text{S}^{2-}$; 硫化物: 辉钼矿 > 黄铁矿 > 闪锌矿 > 黄铜矿 > 方铅矿 (Ohmoto, 1972; 郑永飞和陈江峰, 2000; 韩吟文等, 2003)。铁格隆南矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 石膏 > $\delta^{34}\text{S}$ 黄铜矿 > $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿, 则硫同位素未完全达到平衡, 表明铁格隆南矿床热液成矿作用的多样性和复杂性。

6.2 黄铁矿对矿化的指示意义

铁格隆南矿床的黄铁矿主要以浸染状和脉状产出。脉状黄铁矿脉宽变化不一, 但极其发育, 脉状黄铁矿在空间上呈现出一定的变化特征, 900 m 以上的黄铁矿主要以脉体形式产出, 少量浸染状产出, 而 900 m 以下黄铁矿则主要以细脉状 (<1 cm)、浸染状产出。且以 ZK1604 的 250 m 为中心脉状黄铁矿的脉宽横向上向东的 ZK2404、ZK3204、ZK4004 和 ZK4804 逐渐变小, 纵向上向深部到 900 m 深度脉宽也逐渐减小。厚大的黄铁矿脉体的形成通常需要充足的含硫热液的参与, 结合矿床内脉状黄铁矿的分布特征认为铁格隆南矿床含硫热液运移方向为横向上从 ZK1604 向东运移, 纵向以 ZK1604 的 230—250 m 为中心向深部和侧向运移。

黄铁矿的微量元素特征表明 Cu、Au、Ag 成矿元素在与浅成低温热液型矿化有关的黄铁矿-2 中含量最大, 无明显矿化的黄铁矿-1 中的 Cu、Au、Ag 成矿元素的含量最低, 与斑岩型矿化有关的黄铁矿-3 的上述元素含量介于两者之间。黄铁矿-2 内 Ag 和 Cu、Pb 和 Zn、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb 均呈现出明显的正相关性, 而 Cu 和 Ni 无明显的相关性; 黄铁矿-3 内 Ag 和 Cu、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb、Pb 和 Zn 无明显的相关性, 而 Cu 和 Ni 呈现出较好的负相关性。

黄铁矿中高含量的 Cu、Au、Ag 以及 Ag 和 Cu、Pb 和 Zn、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb 的正相关性是指示浅成低温型矿化重要标志, 而黄铁矿内 Cu 和 Ni 的负相关性是指示斑岩型矿化的标志。黄铁矿中的 Te、Se、Co、Zr 纵向的分布特征对于斑岩型矿化和浅成低温热液型矿化具有一定的指示意义。

除此之外, 本研究还发现大多数发育在长石石英砂岩中的黄铁矿样品中 Cu 和 Pb、Pb 和 Zn 具有

正相关关系, Zn 元素含量较高, 而发育在斑岩中的黄铁矿样品中 Cu 和 Pb、Pb 和 Zn 无明显相关性且 Zn 含量极低。不同岩石的成分是否会影响其中黄铁矿的成分, 黄铁矿内的元素矿物对的相关性是否可以判别岩石类型仍需要进一步研究。

7 结论

1) 铁格隆南矿床的黄铁矿可分为三类: 黄铁矿-1, 黄铁矿-2 和黄铁矿-3, 其中黄铁矿-2 和黄铁矿-3 与铜矿化关系密切。黄铁矿-1 内 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi 的含量最低; 黄铁矿-2 内 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi 的含量最高, 且 Ag 和 Cu、Pb 和 Zn、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb 均呈现出明显的正相关性; 黄铁矿-3 内 Ag 和 Cu、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb、Pb 和 Zn 无明显的相关性, 而 Cu 和 Ni 呈现出较好的负相关性。

2) 黄铁矿-1 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值最大为 1.9‰ ; 黄铁矿-2 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-4.5\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$, 平均值为 -1.9‰ ; 黄铁矿-3 的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-2.2\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$, 平均值为 -0.8‰ 。200—500 m 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.5\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$, 随深度增加呈逐渐减小的趋势, 500—960 m 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-3.1\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$ 且随深度增加呈逐渐增大的趋势, 960—1100 m 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.1\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$, 均大于 0 且随深度增加逐渐减小。

3) 黄铁矿均呈现出轻稀土富集, 重稀土亏损的“右倾”式稀土配分模式, 产于深部 (700—1000 m) 和浅部 (200—450 m) 的黄铁矿的稀土元素特征存在差异, 浅部黄铁矿的轻重稀土分异程度较大, 以正铕异常为主, 而深部黄铁矿轻重稀土分异相对较小, 以负铕异常为主。

4) 铁格隆南矿床含硫热液运移方向为横向上从 ZK1604 向东运移, 纵向以 ZK1604 的 230—250 m 为中心向深部和侧向运移。黄铁矿中高含量的 Cu、Au、Ag 以及 Ag 和 Cu、Pb 和 Zn、Cu 和 Pb、Ag 和 Pb 的正相关性是指示浅成低温型矿化的重要标志, 而黄铁矿内 Cu 和 Ni 的负相关性是指示斑岩型矿化的标志。

致谢: 感谢西藏金龙矿业股份有限公司和西藏地勘局地质五队对野外工作的支持与帮助。感谢国家地质测试中心、核工业北京地质研究所、中铁资源集团中心实验室的老师对本文中实验工作的帮助。感谢匿名审稿专家对本文提出的宝贵意见。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No.

2022YFC2905001), National Natural Science Foundation of China (No. 42002103), and China Geological Survey (No. DD20230054).

参考文献:

- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(1): 1-4.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 陈懋弘, 吴六灵, UTTLEY P J, NORMAN T, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿床含砷黄铁矿和脉石英及其包裹体的稀土元素特征[J]. 岩石学报, 23(10): 2423-2433.
- 方向, 唐菊兴, 李彦波, 王勤, 丁帅, 张志, 杨超, 李玉彬, 陈红旗, 卫鲁杰, 尼玛. 2014. 西藏多龙矿集区拿若铜(金)矿床成矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型[J]. 中国地质, 41(3): 936-950.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1996. 胶东乳山金矿田成因矿物学[M]. 北京: 地质出版社.
- 李厚民, 沈远超, 毛景文, 刘铁兵, 朱和平. 2003. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征——以胶东焦家式金矿为例[J]. 岩石学报, 19(2): 267-274.
- 李玉彬, 钟婉婷, 张天平, 陈华安, 李玉昌, 陈红旗, 范安辉. 2012a. 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.
- 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. 2012b. 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.
- 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, 陈毓川, 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 贺文, 刘治博, 王艺云, 李彦波, 杨超, 杨欢欢, 张乐骏, 李玉彬. 2018. 西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿床地质、蚀变与矿化[J]. 矿床地质, 37(5): 917-939.
- 宋扬, 唐菊兴, 曲晓明, 王登红, 辛洪波, 杨超, 林彬, 范淑芳. 2014. 西藏班公湖—怒江成矿带研究进展及一些新认识[J]. 地球科学进展, 29(7): 795-809.
- 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. 2014a. 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, 王勤, 杨超, 丁帅, 郎兴海, 刘鸿飞, 黄勇, 郑文宝, 王立强, 高一鸣, 冯军, 段吉琳, 宋扬, 王艺云, 林彬, 方向, 张志, 杨欢欢. 2014b. 青藏高原两个斑岩-浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践[J]. 矿床地质, 33(6): 1151-1170.
- 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, 栗登逵, 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.
- 余宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义[J]. 矿床地质, 28(6): 737-746.
- 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.
- 杨欢欢, 唐菊兴, 张忠, 王勤, 张志, 宋扬, 杨超, 王艺云, 丁帅, 方向, 林彬, 高轲, 袁华山. 2016. 西藏铁格隆南铜(金-银)矿床环带状黄铁矿及其地质意义[J]. 矿物学报, 36(1): 70-79.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵洁心, 鲍明学. 2007. 焦家金矿床黄铁矿标型特征及含金性分析[J]. 黄金, 28(9): 19-23.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 卫鲁杰, 刘朝强. 2012. 西藏多不杂斑岩铜金矿床地质与蚀变[J]. 地质与勘探, 48(2): 199-206.

References:

- ABRAITIS P K, PATTRICK R A D, VAUGHAN D J. 2004. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 74(1-4): 41-59.
- BI Xian-wu, HU Rui-zhong, PENG Jian-tang, WU Kai-xing. 2004. REE and HFSE Geochemical Characteristics of Pyrites in Yao'an Gold Deposit: Tracing Ore Forming Fluid Signatures[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 23(1): 1-4(in Chinese with English abstract).
- CHEN Guang-yuan, SUN Dai-sheng, YIN Hui-an. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House(in Chinese).
- CHEN Guang-yuan, SHAO Wei, SUN Dai-sheng. 1989. Genetic Mineralogy and Prospecting of Jiaodong Gold Deposit[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House(in Chinese).
- CHEN Mao-hong, WU Liu-ling, UTTLEY P J, NORMAN T, ZHENG Jian-min, QIN Yun-zhong. 2007. REE features of arsenian pyrite and vein quartz and their fluid inclusions in the Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2423-2433(in Chinese with English abstract).
- DEDITIUS A P, UTSUNOMIYA S, REICH M, KESLER S E, EWING R C, HOUGH R, WALSHE J. 2011. Trace metal na-

- noparticles in pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 42(1): 32-46.
- DEDITIUS A P, REICH M, KESLER S E, UTSUNOMIYA S, CHRYSSOULIS S L, WALSHE J, EWING R C. 2014. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 140: 644-670.
- DELLWIG O, BÖTTCHER M E, LIPINSKI M, BRUMSACK H J. 2002. Trace metals in Holocene coastal peats and their relation to pyrite formation (NW Germany)[J]. *Chemical Geology*, 182(2-4): 423-442.
- FANG Xiang, TANG Ju-xing, LI Yan-bo, WANG Qin, DING Shuai, ZHANG Zhi, YANG Chao, LI Yu-bin, CHEN Hong-qi, WEI Lu-jie, NI Ma. 2014. Metallogenic Element Spatial Distribution of the Naruo Copper (Gold) Deposit in the Duolong Ore Concentration Area of Tibet and its Geochemical Exploration Model[J]. *Geology in China*, 41(3): 936-950(in Chinese with English abstract).
- GIRARDEAU J, MARCOUX J, ALLEGRE C J, BASSOULLET J P, TANG You-king, XIAO Xu-chang, ZAO You-gong, WANG Xi-bin. 1984. Tectonic environment and geodynamic significance of the Neo-Cimmerian Donqiao ophiolite, Bangong-Nujiang suture zone, Tibet[J]. *Nature*, 307(5946): 27-31.
- HAN Yin-wen, MA Zhen-dong, ZHANG Hong-fei, ZHANG Ben-ren, LI Fang-lin, GAO Shan, BAO Zheng-yu. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- HUERTA-DIAZ M A, MORSE J W. 1992. Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(7): 2681-2702.
- HUSTON D L, SIE S H, SUTER G F, COOKE D R, BOTH R A. 1995. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: part I. Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and part II. Selenium levels in pyrite: comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 90(5): 1167-1196.
- LI Sheng-rong, CHEN Guang-yuan, SHAO Wei, SUN Dai-sheng. 1996. *Genetic Mineralogy of Rushan Gold field, Jiaodong*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Hou-min, SHEN Yuan-chao, MAO Jing-wen, LIU Tie-bing, ZHU He-ping. 2003. REE features of quartz and pyrite and their fluid inclusions: an example of Jiaojia-type gold deposits, Northwestern Jiaodong peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 267-274(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-ming, LI Jin-xiang, QIN Ke-zhang, DUO Ji, ZHANG Tian-ping, XIAO Bo, ZHAO Jun-xing. 2012. Geology and Hydrothermal Alteration of the Duobuza Gold-Rich Porphyry Copper District in the Bangongco Metallogenic Belt, Northwestern Tibet[J]. *Resource Geology*, 62(1): 99-118.
- LI Jin-xiang, QIN Ke-zhang, LI Guang-ming, XIAO Bo, ZHAO Jun-xing, CAO Ming-jian, CHEN Lei. 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 Jin-xiang, QIN Ke-zhang, LI Guang-ming, RICHARDS J P, ZHAO Jun-xing, CAO Ming-jian. 2014. Geochronology, geochemistry, and zircon Hf isotopic compositions of Mesozoic intermediate-felsic intrusions in central Tibet: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Lithos*, 198-199: 77-91.
- LI Yu-bin, ZHONG Wan-ting, ZHANG Tian-ping, CHEN Hua-an, LI Yu-chang, CHEN Hong-qi, FAN An-hui. 2012a. Geochemical Characteristics and Genesis of the Bolong Porphyry Copper-Gold Deposit in Gerze County, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 579-587(in Chinese with English abstract).
- LI Yu-bin, DUO Ji, ZHONG Wan-ting, LI Yu-chang, QIANGBA Wang-dui, CHEN Hong-qi, LIU Hong-fei, ZHANG Jin-shu, ZHANG Tian-ping, XU Zhi-zhong, FAN An-hui, SUOLANG Wang-qin. 2012b. 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).
- LIN Bin, CHEN Yu-chuan, TANG Ju-xing, SONG Yang, WANG Qin, FENG Jun, LI Yan-bo, TANG Xiao-qian, LIN Xin, LIU Zhi-bo, WANG Yi-yun, FANG Xiang, YANG Chao, YANG Huan-huan, FEI Fan, LI Li, GAO Ke. 2016. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope 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 Bin, TANG Ju-xing, CHEN Yu-chuan, SONG Yang, HALL G, WANG Qin, YANG Chao, FANG Xiang, DUAN Ji-lin, YANG Huan-huan, LIU Zhi-bo, WANG Yi-yun, FENG Jun. 2017. 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): 1-21.
- LIN Bin, CHEN Yu-chuan, TANG Ju-xing, SONG Yang, WANG Qin, HE Wen, LIU Zhi-bo, WANG Yi-yun, LI Yan-bo, YANG Chao, YANG Huan-huan, ZHANG Le-jun, LI Yu-bin. 2018. Geology, alteration and mineralization of Tiegelongnan giant Cu (Au, Ag) deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 37(5): 917-939(in Chinese with English abstract).
- LOWERS H A, BREIT G N, FOSTER A L, WHITNEY J, YOUNT J, UDDIN M N, MUNEEB A A. 2007. Arsenic incorporation into authigenic pyrite, Bengal Basin sediment, Bangladesh[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(11): 2699-2717.
- MUROWCHICK J B, BARNES H L. 1987. Effects of temperature and degree of supersaturation on pyrite morphology[J]. *American Mineralogist*, 72(11-12): 1241-1250.
- METCALFE I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J].

- Journal of Asian Earth Sciences, 66: 1-33.
- NEUMANN T, SCHOLZ F, KRAMAR U, OSTERMAIER M, RAUSCH N, BERNER Z. 2013. Arsenic in framboidal pyrite from recent sediments of a shallow water lagoon of the baltic sea[J]. Sedimentology, 60(6): 1389-1404.
- OHMOTO H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 67(5): 551-578.
- PAN Gui-tang, WANG Li-quan, LI Rong-she, YUAN Si-hua, JI Wen-hua, YIN Fu-guang, ZHANG Wan-ping, WANG Bao-di. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 53: 3-14.
- SHE Hong-quan, LI Jin-wen, MA Dong-fang, LI Guang-ming, ZHANG De-duan, FENG Cheng-you, QU Wen-Jun, PAN Gui-tang. 2009. Molybdenite Re-Os and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Duobuza Porphyry Copper Deposit in Tibet and Its Geological Implications[J]. Mineral Deposits, 28(6): 737-746(in Chinese with English abstract).
- SHI Ren-deng. 2007. SHRIMP dating of the Bangong Lake SSZ-type ophiolite: Constraints on the closure time of ocean in the Bangong Lake-Nujiang River, northwestern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 52(7): 936-941.
- SONG Yang, TANG Ju-xing, QU Xiao-ming, WANG Deng-hong, XIN Hong-bo, YANG Chao, LIN Bin, FAN Shu-fang. 2014. Progress in the Study of Mineralization in the Bangongco-Nujiang Metallogenic Belt and Some New Recognition[J]. Advances in Earth Science, 29(7): 795-809(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, SUN Xing-guo, DING Shuai, WANG Qin, WANG Yi-yun, YANG Chao, CHEN Hong-qi, LI Yan-bo, LI Yu-bin, WEI Lu-jie, ZHANG Zhi, SONG Jun-long, YANG Huan-huan, DUAN Ji-lin, GAO Ke, FANG Xiang, TAN Jiang-yun. 2014a. Discovery of the Epithermal Deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong Ore Concentrating Area, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(1): 6-10(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Qin, YANG Chao, DING Shuai, LANG Xing-hai, LIU Hong-fei, HUANG Yong, ZHENG Wen-bao, WANG Li-qiang, GAO Yi-ming, FENG Jun, DUAN Ji-lin, SONG Yang, WANG Yi-yun, LIN Bin, FANG Xiang, ZHANG Zhi, YANG Huan-huan. 2014b. Two Porphyry-Epithermal Deposit Metallogenic Subseries in Tietan Plateau: Practice of "Absence Prospecting" Deposit Metallogenic Series[J]. Mineral Deposits, 33(6): 1151-1170(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, SONG Yang, WANG Qin, LIN Bin, YANG Chao, GUO Na, FANG Xiang, YANG Huan-huan, WANG Yi-yun, GAO Ke, DING Shuai, ZHANG Zhi, DUAN Ji-lin, CHEN Hong-qi, SU Deng-kui, FENG Jun, LIU Zhi-bo, WEI Shao-gang, HE Wen, SONG Jun-long, LI Yan-bo, WEI Lu-jie. 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 Geoscientica Sinica, 37(6): 663-690(in Chinese with English abstract).
- YANG Chao, TANG Ju-xing, WANG Yi-yun, YANG Huan-huan, WANG Qin, SUN Xing-guo, FENG Jun, YIN Xian-bo, DING Shuai, FANG Xiang, ZHANG Zhi, LI Yu-bin. 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 Huan-huan, TANG Ju-xing, ZHANG Zhong, WANG Qin, ZHANG Zhi, SONG Yang, YANG Chao, WANG Yi-yun, DING Shuai, FANG Xiang, LIN Bin, GAO Ke, YUAN Hua-shan. 2016. A Study on Banded Pyrite in Tiegelongnan Copper (Gold-Silver) Deposit, Tibet, China and Its Geological Implications[J]. Acta Mineralogica Sinica, 36(1): 70-79(in Chinese with English abstract).
- YIIN An, HARRISON T M. 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280.
- ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. 2000. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHAO Jie-xin, BAO Ming-xue. 2007. Analysis on typomorphic characteristics and gold bearing properties of pyrite in Jiaojia gold deposit[J]. Gold, 28(9): 19-23(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xiang-ping, CHEN Hua-an, MA Dong-fang, HUANG Han-xiao, LI Guang-ming, WEI Lu-jie, LIU Chao-qiang. 2012. Geology and Alteration of the Duobuza Porphyry Copper-gold Deposit in Tibet[J]. Geology and Exploration, 48(2): 199-206(in Chinese with English abstract).