

青海省治多县查涌铜多金属矿床成矿年代学研究

岳龙龙¹, 刘英超¹, 马旺¹, 庄亮亮¹, 黄世强², 吴志漪²

(1. 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:“三江”成矿带为我国重要的多金属成矿带, 带内中北段玉树多彩矿集区发育多种类型的铜多金属矿床, 资源潜力巨大, 但成矿年龄不详, 严重制约了对矿床和区域成矿规律的理解。因此, 本次工作选取矿集区西北部查涌铜多金属矿床为研究对象, 在详细地质踏勘的基础上, 对其成矿年代进行了系统研究, 以期填补该地区此类型矿床成矿年龄的空白。研究表明, 查涌铜多金属矿床分别发育 Cu-Mo 矿体和 Pb-Zn 矿体, Cu-Mo 矿体赋存在变质粉砂岩内, 形成于石英硫化物阶段。角岩化砂岩中黑云母 $Mg-(Al^{VI} + Fe^{3+} + Ti)-(Fe^{2+} + Mn)$ 的投图具镁质黑云母特征, Al_2O_3/TiO_2 值介于 6.359~10.087 之间, $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ 值均一, 为热液成因, 且未受后期流体改造, $^{40}Ar-^{39}Ar$ 同位素定年获得黑云母封闭年龄为 129.59 ± 1.58 Ma。穿切黄铜矿的辉钼矿 Re 含量为 $0.864 \times 10^{-6} \sim 9.624 \times 10^{-6}$, 具壳源属性, 其 Re-Os 同位素等时线年龄为 124.75 ± 0.86 Ma。热液黑云母与较晚的辉钼矿年龄相近, 应为同期岩浆热液事件的产物。本次研究精确厘定了“三江”带中北段内一例典型的与岩浆热液成矿作用相关铜多金属矿床的成矿年龄, 揭示出早白垩世的一期成矿事件, 为“三江”成矿带的成矿规律总结和勘查找矿指明了新的方向。

关键词: 查涌铜多金属矿床; 辉钼矿; Re-Os 同位素测年; 黑云母; $^{40}Ar-^{39}Ar$ 同位素测年; “三江”成矿带

中图分类号: P618.41; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)01-0047-18

Metallogenic chronology of the Chayong Cu-polymetallic deposit in Zhiduo County, Qinghai Province

YUE Long-long¹, LIU Ying-chao¹, MA Wang¹, ZHUANG Liang-liang¹, HUANG Shi-qiang² and WU Zhi-yi²

(1. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Sanjiang metallogenic belt is one of the most important polymetallic ore-forming belt in China. The Duocai ore concentration area possesses various types of Cu polymetallic deposits in its middle and north part, and its mineral resource potential is huge; nevertheless, the ambiguous mineralization age seriously restricts the understanding of the ore deposits and regional mineralization regularity. In view of such a situation, the authors selected the Chayong copper polymetallic deposit in this belt and conducted a complete systematic research on its mineralization chronology based on detailed field exploration and microscopic mineralogical identification so as to fill the research blank of the ore-forming age in this area. The results indicate that there are two kinds of orebodies in the Chayong copper polymetallic deposit, mainly Cu-Mo orebodies, which were developed in the metamorphic siltstone

收稿日期: 2019-05-27; 接受日期: 2019-11-16; 编辑: 郝艳丽

基金项目: “深地资源勘查开采”重点专项(2016YFC0600306); 国家自然科学基金资助项目(41773042, 41922022, 41773043, 41772088, 41702082, 91962105); 自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题(J1901-6); 国际地质对比计划(IGCP-662)

作者简介: 岳龙龙(1995-), 男, 硕士研究生在读, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yllphoenix@163.com; 通讯作者: 刘英超(1982-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事矿床学研究, E-mail: lychappy@126.com。

and mainly occurred at the quartz and sulfide stage. The biotite in hornfels shows that the points of $Mg-(Al^{VI} + Fe^{3+} + Ti)-(Fe^{2+} + Mn)$ in diagram fall within the range of magnesium biotite, the value of Al_2O_3/TiO_2 is between 6.359 and 10.087 and the ratio of $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ is comparatively uniform. Based on the above data, the authors hold that it is hydrothermal biotite unmodified by late fluids. The authors confirmed the closure age of hydrothermal biotite by the $^{40}Ar-^{39}Ar$ plateau age of 129.59 ± 1.58 Ma. In addition, molybdenites which penetrate into chalcopyrite have the rhenium content from 0.864×10^{-6} to 9.624×10^{-6} . These values indicate that the metallogenic material of molybdenite was probably derived from the crust. The Re-Os isochron age of molybdenite is 124.75 ± 0.86 Ma. In conclusion, the age of hydrothermal biotite is similar to that of molybdenite, and it is held that both of them should belong to the same period of magmatic hydrothermal event as shown by their closure age. This study accurately determined the metallogenic age of a typical magmatic hydrothermal Cu polymetallic metallogenic deposit in the middle and northern part of the Sanjiang metallogenic belt, revealing that there was a mineralization event during the Early Cretaceous, and these data indicate a new direction for studying regional metallogenic regularity and for prospecting work in the Sanjiang metallogenic belt.

Key words: Chayong Cu polymetallic deposit; molybdenite; Re-Os isotopic dating; biotite; $^{40}Ar-^{39}Ar$ isotopic dating; Sanjiang metallogenic belt

Fund support: National Key R&D Program of China (2016YFC0600306); National Natural Science Foundation of China (41773042, 41922022, 41773043, 41772088, 41702082, 91962105); Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources (J1901-6); IGCP-662 Program

“三江”成矿带发育在青藏高原东北缘,夹持于金沙江和班公湖-怒江两条缝合带之间,是印度-欧亚大陆碰撞的关键构造转换带(侯增谦等, 2006; 邓军等, 2010),也是我国重要的多金属成矿带(刘增乾等, 1993; Hou *et al.*, 2007; 邓军等, 2011)。带内发育斑岩型 Cu-Mo-Au(侯增谦, 2004; 侯增谦等, 2004)、造山型 Au(Sun *et al.*, 2009)、沉积岩容矿 Pb-Zn(-Ag)(侯增谦等, 2008; 宋玉财等, 2011)和火山热液 VMS 型 Cu-Pb-Zn(侯增谦等, 1991)等成矿系统(Hou *et al.*, 2003, 2006; Yang *et al.*, 2014; 孙茂好等, 2015; Liu *et al.*, 2011, 2016, 2017; Song *et al.*, 2015),资源潜力巨大。近年来的地质勘探工作发现,“三江”成矿带中北段多彩矿集区发育了多个与岩浆热液相关的铜多金属矿床(图 1b; 陈玉华等, 2011; 郑宗学等, 2012; 辛天贵等, 2014; 张万辉等, 2017; 祁永爱等, 2018),到 2015 年,矿集区内 Cu-Pb-Zn 金属量已超过 200 万吨(王键, 2017),成为“三江”带内又一极具资源潜力的 Cu-Pb-Zn 储地。已有的勘探工作和研究工作表明,多彩矿集区内这些铜多金属矿床均发育在晚三叠世巴塘群第 2 岩性段中酸性火山碎屑岩和变质碎屑岩中(郑宗学等, 2012; 禹禄, 2017; 张飞等, 2017; 王键等, 2017; 马晓光等, 2018),而在矿床成因上,则有包括 VMS 型、岩浆热液相关类型、低温热液型等多种认识

(表 1; 赵程龙等, 2013; 沈贵春等, 2013; 王键等, 2017; 王飞, 2017; 金贵海, 2018)。但是,已有的这些工作都是针对矿床地质观察和矿床地球化学研究进行的(张飞等, 2017; 王键等, 2017; 王凤林等, 2017; 马晓光等, 2018; 金贵海, 2018),获得的所有认识都缺失了一个关键成矿要素的支持,那就是成矿年龄,也就是说,到目前为止,多彩矿集区内未曾获得一个精确的成矿年龄。实际上,不管对于火山作用矿床还是岩浆热液矿床来说,成矿年龄都是理解其成矿作用、建立其成矿类型、指导其找矿勘探的最关键因素。基于此,本次工作选择了多彩矿集区内典型矿床之一的查涌铜多金属矿床,进行了详细的野外地质踏勘和室内薄片观察,对最新发现的成矿阶段的辉钼矿和黑云母进行了系统的放射性同位素年代学工作,以期填补“三江”中北段多彩矿集区内这套与岩浆热液相关的铜多金属矿床成矿年龄认识的空白。

1 区域地质背景

多彩矿集区所在的玉树地区在大地构造位置上属于北羌塘-昌都地体北部,金沙江缝合带和甘孜-理塘缝合带相接位置南部(图 1a),区内先后经历了晚古生代到中生代古特提斯阶段的洋盆扩张(刘增

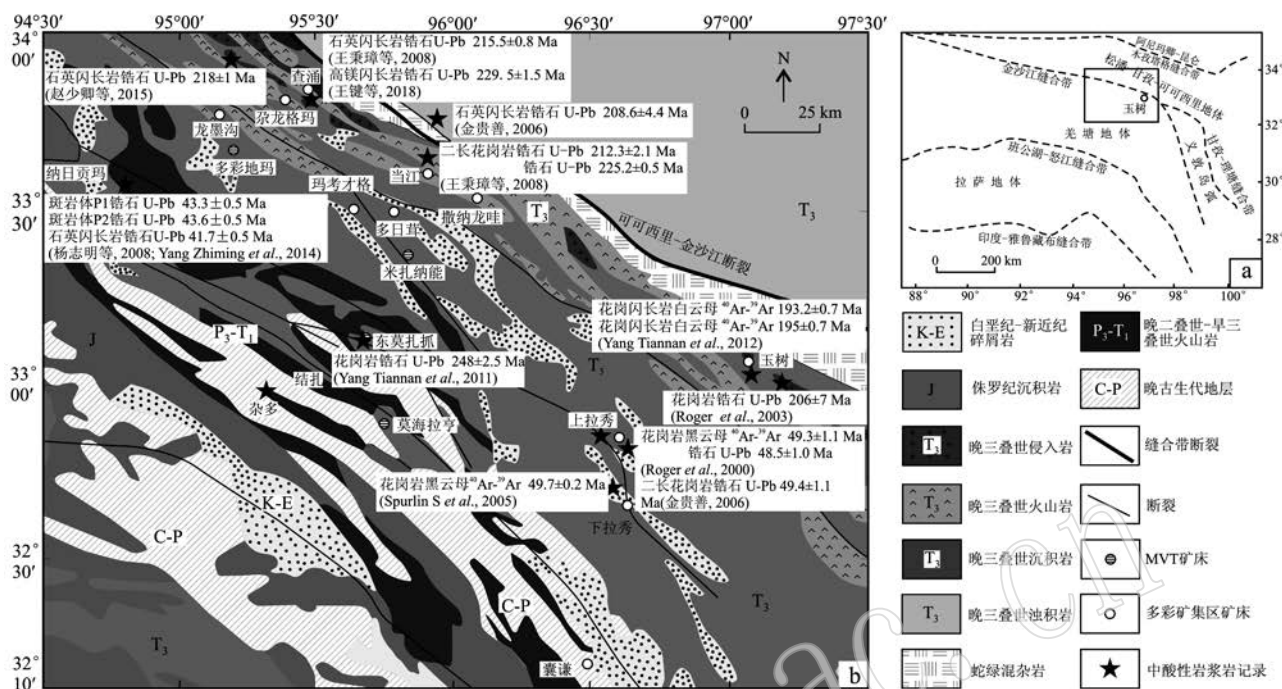


图 1 玉树地区大地构造位置图 [a, 据 Liu Yingchao 等(2011)修改]和区域构造及矿点分布图 [b, 据张飞等(2017)和 Liu Yingchao 等(2011)修改]

Fig. 1 Tectonic location of Yushu region (a, modified after Liu Yingchao *et al.*, 2011) and map of regional structure showing the distribution of Cu polymetallic deposits (b, modified after Zhang Fei *et al.*, 2017 and Liu Yingchao *et al.*, 2011)

乾, 1993)、俯冲造山(莫宣学, 1993)、碰撞伸展作用(王成善等, 2001)和新特提斯阶段的地体拼贴(Yin and Harsion, 2000; Spurlin *et al.*, 2005)、俯冲凹陷作用(王成善等, 2001)。复杂的地质演化历史导致地层建造复杂多样, 从早到晚表现为从石炭系至侏罗系为海相沉积和火山碎屑沉积, 白垩系至新近系为陆相沉积, 局部有多套蛇绿混杂岩出露(图 1b、图 2)。区内岩浆活动活跃, 大体有 248 Ma(Yang *et al.*, 2011)、230 ~ 206 Ma(Roger *et al.*, 2003; 金贵善, 2006; 王秉璋等, 2008; 赵少卿等, 2015; 王键等, 2018)、195 ~ 193 Ma(Yang *et al.*, 2012)、50 ~ 41 Ma(Roger *et al.*, 2000; Spurlin *et al.*, 2005; 金贵善, 2006; 杨志明等, 2008; Yang *et al.*, 2014) 4 个峰期阶段, 分别发育了花岗岩、石英闪长岩-二长花岗岩-闪长岩、花岗闪长岩-二长花岗岩-石英闪长岩和高钾钙碱性斑岩。多彩铜多金属矿集区主要发育在区内西北部, 紧邻金沙江缝合带, 目前已发现包括尕龙格玛、查涌、撒纳龙哇、龙墨沟、当江、多日茸、玛考才格在内的 7 个矿床(表 1)。这些矿床的矿体主要赋存在晚三叠世巴塘群火山碎屑岩、火山岩或变质碎屑岩和灰岩地层中(图 2), 矿体主要呈脉状,

矿石呈块状或浸染状, 大致可分为岩浆热液成因的矿床和火山成因的块状硫化物矿床两种类型。部分已研究的矿床的成矿流体来源为岩浆水和大气降水或海水的混合(表 1)。

2 矿床地质特征

查涌铜多金属矿床位于青海省南部治多县境内的多彩乡, 目前已发现有经济意义的矿化带 3 条, 圈定 Cu-Mo 矿体 7 条、Pb-Zn 矿体 3 条, 探明铜铅锌金属量超过 30 万吨, 钼 5 万吨(姜和芳, 2017)(表 1)。

矿区主要出露上三叠统巴塘群第 2 岩性段(T_3B_2)地层, 地层岩性包括石英砂岩夹粉砂质片岩、粉砂质板岩、变质粉砂岩、凝灰质板岩和灰岩, 地层北西西向展布, 总体向北陡倾, 局部倾角可达 80° 左右(图 3)。发育两组断层, 一组北西-南东向分布, 主要以康刹勤断层展现, 此为一区域性逆断层, 倾向北东, 倾角 65° 左右, 构成了矿区的主体构造格架; 另一组为北东-南西向分布, 规模较小, 明显切割北西-南东向断裂。岩浆岩广泛出露, 具体包括花岗闪长岩、石英闪长岩、玄武岩、辉长岩(图 3)。其中花岗闪

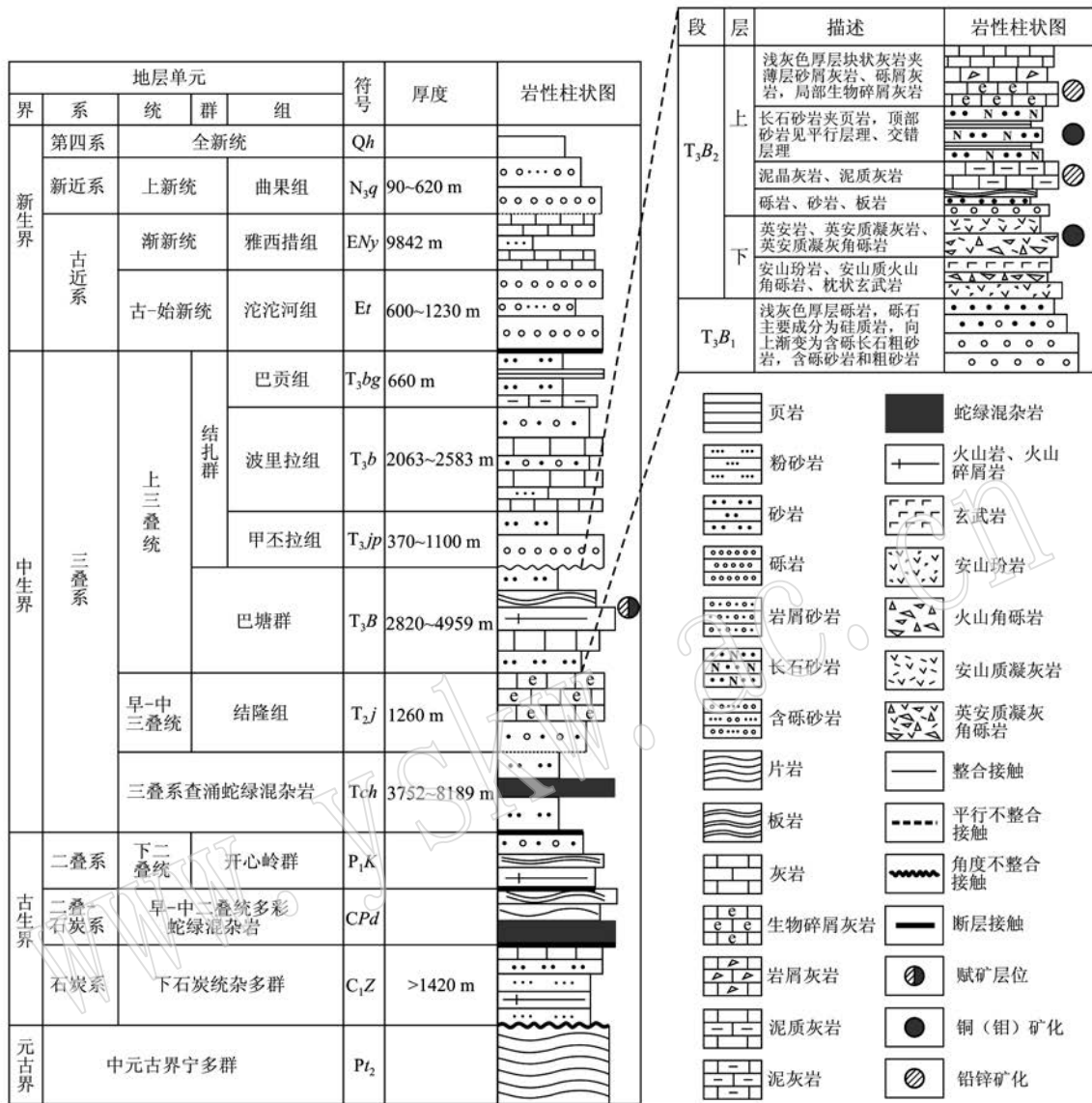


图2 “三江”中北段玉树地区区域地层简图[据姜和芳(2017)修改,地层接触关系据王键(2017)修改]

Fig. 2 Stratigraphic column of the Yushu area in the middle part of Sanjiang belt (modified after Jiang Hefang, 2017; stratigraphic contact relationship modified after Wang Jian, 2017)

长岩和石英闪长岩在矿区西南出露,已有的研究认为其属晚三叠世的岩浆活动产物(230~216 Ma;王秉璋等,2008;王键等,2018);玄武岩出露于矿区东北部,由于受到了多期岩浆活动和热扰动事件影响,其准确的结晶时代尚未确定(王键,2017);辉长岩在矿区中部以岩脉形式分散出露,多期岩浆侵位捕获了古生代-三叠纪的岩浆锆石,最新的锆石 U-Pb 定年结果表明其最近的侵位结晶年龄为 33.1 ± 1.8 Ma(姜和芳,2017)。

矿区发育多条 Cu-Mo 矿体和 Pb-Zn 矿体。其中 Cu 矿体发育在矿区中部矿化带,已发现矿体 7 条,

矿体走向和区域构造走向基本一致,倾向北,倾角 $43^\circ \sim 78^\circ$ 之间(图3)。矿体长度介于 150~670 m 之间,厚度介于 1.15~14.34 m 之间,Cu 品位在不同矿体变化较大,介于 0.20%~8.44% 之间(张万辉等,2017)。这些 Cu 矿体具体发育在变质粉砂岩和粉砂质板岩的接触部位,或是分布于近东西走向的次级断裂的破碎带中,总体由脉状黄铜矿+黄铁矿组成,见少量浸染状方铅矿和闪锌矿,深部砂岩中发育辉钼矿细脉。与矿区中部 Cu 矿体不同,Mo 矿体主体位于深部,矿体走向与 Cu 矿体一致,倾向北,走向上长 800 m,厚度介于 200~500 m 之间,品位一般为

表 1 多彩矿集区与岩浆热液作用有关的铜多金属矿床地质特征略表
Table 1 Characteristics of the Cu polymetallic deposits related to volcanism/magma hydrothermal process in the Duocai ore concentration area

矿区	成矿金属	金属量	矿石品位	赋矿位置	矿体产状	矿石构造	金属矿物/非金属矿物	地球化学特征	已有研究提出的矿床类型
查涌	Cu、Mo、Pb、Zn	Cu+Pb+Zn: 30.1 万吨 Mo: 5 万吨	Cu: 0.20%~8.44% Mo: 0.03%~0.36% Pb: 0.78%~4.14% Zn: 0.56%~2.17%	晚三叠世巴塘群第 2 岩性组石英砂岩、粉砂质板岩、凝灰质板岩和灰岩等	脉状和透镜状	浸染状、薄膜状和块状	黄铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿/石英、阳起石和透闪石	成矿流体温度 233.4~415.9℃，盐度 0.53%~6.29%，来源以岩浆水为主；还原硫主要来自三叠纪地层，混有少量有机硫；Pb 来源于上地壳，混入少量的下地壳的铅	火山沉积-热液改造型（赵程龙等，2013）；热液脉型铜多金属矿床（姜和芳，2017）；岩浆热液型（王凤林等，2017）；岩浆热液型/砂卡岩型矿床（张万辉等，2017）
龙墨沟	Cu、Pb、Zn	Cu+Pb+Zn: 5.56 万吨	Cu 平均 1.60% Pb 平均 0.5% Zn 平均 0.63%	晚三叠世巴塘群第 2 岩性组灰绿色蚀变安山岩、英安质凝灰岩、英安岩、灰岩等	脉状、破碎带	以浸染状和块状为主	辉铜矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿/石英、绿泥石、绿帘石	—	与火山岩有关的喷流沉积-叠加改造型（沈贵春等，2013；曹成刚等，2014）
杂龙格玛	Cu、Pb、Zn	Cu+Pb+Zn: 115 万吨	Cu 平均 2.33% Pb 平均 2.16% Zn 平均 2.76%	晚三叠世巴塘群安山质凝灰岩和浅变质岩	脉状、透镜状、似层状	条带状、块状、浸染状	黄铜矿、斑铜矿、砷黝铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿/重晶石、方解石、石英、绿帘石	成矿流体温度 175.6~356.7℃，盐度 1.39%~7.99%	VMS 型矿床（陈玉华等，2011；禹禄，2017；王键等，2017）
当江	Cu、Mo	Cu: 6.9 万吨 Pb: 0.42 万吨 Zn: 0.78 万吨	Cu: 0.232%~0.312% Mo: 0.01%~0.036%	晚三叠世巴塘群第 2 岩性组凝灰岩和长石石英砂岩等	脉状、透镜状	浸染状、块状、薄膜状	黄铜矿、辉铜矿、辉钼矿/石英、绿泥石、方解石	—	VMS 型矿床（卢世银等，2014）、火山喷流沉积-构造热液充填型（马炳春等，2018）
多口茸	Pb、Zn、Cu	Pb+Zn: 2.2 万吨	Cu: 1.61%~6.24% Zn: 1.46%~15.11% Pb 最高 5.00%	晚三叠世巴塘群第 2 岩性组凝灰岩和长石石英砂岩、灰岩	脉状	浸染状、团块状	黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿/方解石、石英、绿帘石、重晶石	石英流体包裹体均一温度：170.3~235.6℃，盐度：0.35%~7.58%；成矿深度：1.4~1.9 km；S 可能源于深部岩浆，部分为岩浆硫中混入了重晶石硫	低温热液型矿床（金贵海，2018）、低温热液脉型（王键，2017）
玛考才格	Pb、Zn、Cu	Pb+Zn: 4.8 万吨	Pb: 0.3%~23.26% Zn: 0.57%~4.50% Cu: 0.39%~2.97%	晚三叠世巴塘群第 2 岩性组灰岩和长石石英砂岩、凝灰质砂岩	脉状	浸染状、稠密浸染状、块状	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿/石英、绿帘石、重晶石	—	—
撒纳龙哇	Cu、Pb、Zn	Cu+Pb+Zn: 17.2 万吨	Cu: 0.20%~3.50% Pb: 0.30%~2.16% Zn: 0.50%~4.36%	晚三叠世巴塘群英安质岩屑晶屑凝灰岩	层状、似层状	网脉状、浸染状	黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿/石英、重晶石、方解石	流体温度 91.6~194.8℃，盐度 9.23%，为海水与岩浆水的混合流体；成矿物质主要来自于深部岩浆	VMS 型矿床（王键，2017；王飞，2017；马晓光等，2018）

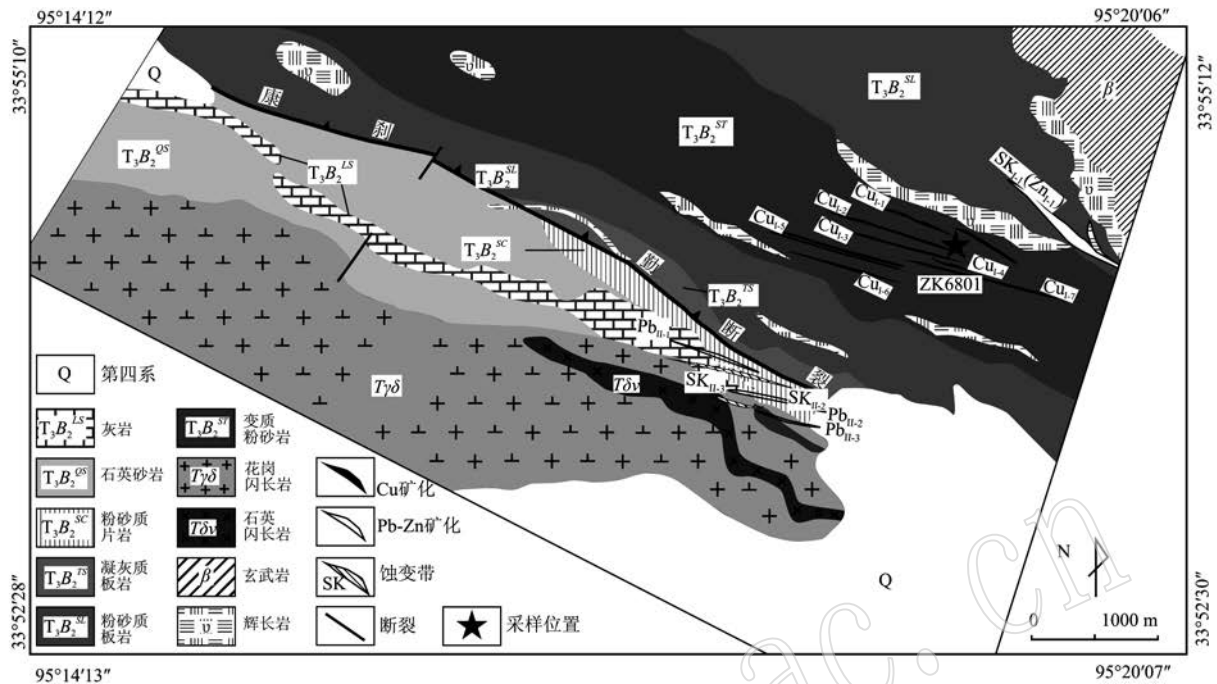


图3 查涌铜多金属矿区地质图[据张万辉等(2017)修改]

Fig. 3 Geological map of the Chayong copper polymetallic deposit (modified after Zhang Wanhui *et al.*, 2017)

0.03% ~ 0.36%，最高达0.39% (张万辉等, 2017)。带内辉钨矿主要沿砂岩裂隙发育, 或分布于石英脉内及石英脉与砂岩接触的位置, 呈细脉状、薄膜状、浸染状。

Pb-Zn 矿体发育在矿区南部和北部矿化带中, 已发现矿体4条, 矿体走向北西-南东, 呈透镜状展布, 倾向北, 倾角 $74^{\circ} \sim 88^{\circ}$ (图3)。矿体长度介于150 ~ 190 m 之间, 厚度介于2.28 ~ 5.08 m 之间, Zn 品位一般介于0.56% ~ 2.17% 之间, Pb 品位介于0.78% ~ 4.14% 之间 (张万辉等, 2017)。北部矿化带 Zn 矿体产于蚀变岩带中, 南部矿化带 Pb-Zn 矿体分别发育在花岗闪长岩与灰岩接触的蚀变岩带 (未有矿物年龄限定二者之间的关系) 和变质粉砂岩、片岩中, 总体由脉状闪锌矿和浸染状闪锌矿 + 方铅矿组成, 见有少量星点状产出的黄铜矿。

矿区蚀变发育, 中部 Cu-Mo 矿化带沿各矿体走向, 自西向东整体表现为绢英岩化、角岩化过渡的趋势, 普遍发育黑云母化蚀变 (图4a、4b、4c), 靠近矿化带处可见大量阳起石、透闪石等 (图5a、5b、5j)。钻孔中揭露蚀变的岩脉, 可见斜长石残晶, 斜长石普遍发育绢云母化蚀变, 呈细小的矿物集合体形态 (图5d); 深部揭露的砂岩发育角岩化 (图4d、4f)。在黑云母化蚀变范围内, 可见两类黑云母: 一类呈弥散

状分布在砂岩中, 呈它形 (图5d、5e、5f); 另一类以鳞片状集合体的形式呈脉状穿入蚀变的岩脉 (图4a)、角岩化砂岩中, 单矿物呈自形, 发育一组完全解理, 角岩化砂岩中亦可见黄铜矿围绕黑云母生长 (图5i、5j)。矿区南部 Pb-Zn 矿体带主要发育在花岗闪长岩与灰岩的接触带和构造破碎带内。

野外和显微镜下观察到的不同类型矿物穿插关系和分布特征 (图4、图5) 显示, 查涌铜多金属矿床发育有典型的岩浆热液蚀变及铁、铜、钼、铅锌矿化, 据此可将岩浆热液期划分为两个阶段, 即第 I 成矿阶段 (硅酸盐阶段) 和第 II 成矿阶段 (石英硫化物阶段) (图6), 具体如下:

(1) 硅酸盐阶段。本阶段发育放射状、针柱状的阳起石和短柱状的透闪石等 (图5a、5b、5j), 并在蚀变的侵入岩脉中见斜长石普遍发育绢云母化 (图5d、5e)。黑云母有两种: 一种呈它形, 弥散状分布在砂岩和蚀变的侵入岩脉中 (图5d、5e、5f); 一种呈自形, 以片状或鳞片状集合体的形式出现在角岩化砂岩中, 并穿切或围绕阳起石生长 (图5i、5j)。

(2) 石英硫化物阶段。本阶段内, 在砂岩和蚀变岩脉中发育大量石英细脉 (图4b、4e、4f、图5e ~ 5g、5k、5l), 黄铁矿与黄铜矿也呈脉状穿入砂岩 (图4d), 或沿石英脉与砂岩的接触位置产出 (图4e、图

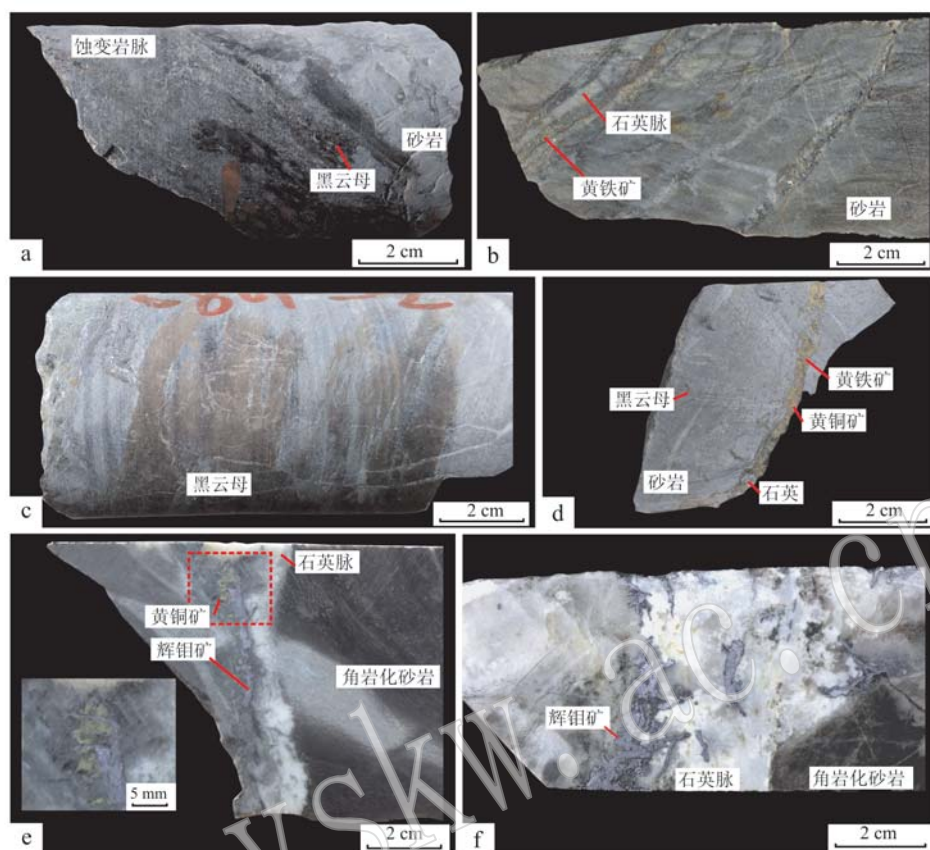


图 4 查涌铜多金属矿床典型手标本照片

Fig. 4 Typical hand specimens from the Chayong copper polymetallic deposit

a—中基性岩脉穿入砂岩,岩脉黑云母化,围岩发生角岩化蚀变; b—砂岩中发育石英脉和黄铁矿脉; c—黑云母角岩; d—黑云母化的砂岩中发育黄铁矿和黄铜矿脉; e—角岩化砂岩中的细脉状辉钼矿穿切黄铜矿; f—辉钼矿呈细脉状充填围岩和石英脉裂隙
a—intermediate-basic dykes penetrating sandstone, the dykes being biotitization and the wall rock transformed to hornfels; b—pyrite veinlet and quartz vein in sandstone; c—hydrothermal biotite hornfels; d—chalcopyrite and pyrite veinlet penetrating biotitization sandstone; e—chalcopyrite intersected by molybdenite veinlet in sandstone; f—molybdenite veinlet filling fractures of wall rock and quartz vein

5f,5g);黄铜矿紧密围绕硅酸盐阶段的热液黑云母和透闪石生长(图 5j);辉钼矿以充填和穿切石英脉和砂岩裂隙的形式出现,并穿切黄铜矿(图 4e)。方铅矿和闪锌矿多呈粒状,不规则分布在黄铜矿或脉状黄铁矿的边缘(姜和芳,2017)。

3 样品选择与测试方法

本次研究对查涌铜多金属矿床石英硫化物阶段的 5 件辉钼矿样品和 1 件黑云母样品分别进行了 Re-Os 同位素和 Ar-Ar 同位素年代学分析,并配合分析了黑云母的化学组成。样品均来自 Cu 矿体的钻孔样品中(ZK6801)(图 3)。

辉钼矿 Re-Os 同位素分析测试工作在国家地质实验测试中心 Re-Os 实验室内完成。通过在双目镜

下对样品进行分离和挑选,用于测试的辉钼矿纯度达到 98% 以上,Re-Os 同位素分析原理及详细实验流程依据文献(杜安道等,1994,2009;屈文俊等,2003)。质谱测定采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)测定同位素的比值。对于 Re: 选择质量数 185、187,用 190 监测 Os。对于 Os: 选择质量数为 186、187、188、189、190、192,用 185 监测 Re。实验采用国家标准物质 GBW04436(JDC)标样监测化学实验流程和校正分析数据。

黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 连续激光阶段升温法定年工作在中国地质科学院地质研究所⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学实验室的 MM1200B 质谱计上完成,挑选的黑云母矿物(纯度 >99%)通过超声波清洗后封进石英瓶中送核反应堆接受中子照射。照射工作在中国原子能科学

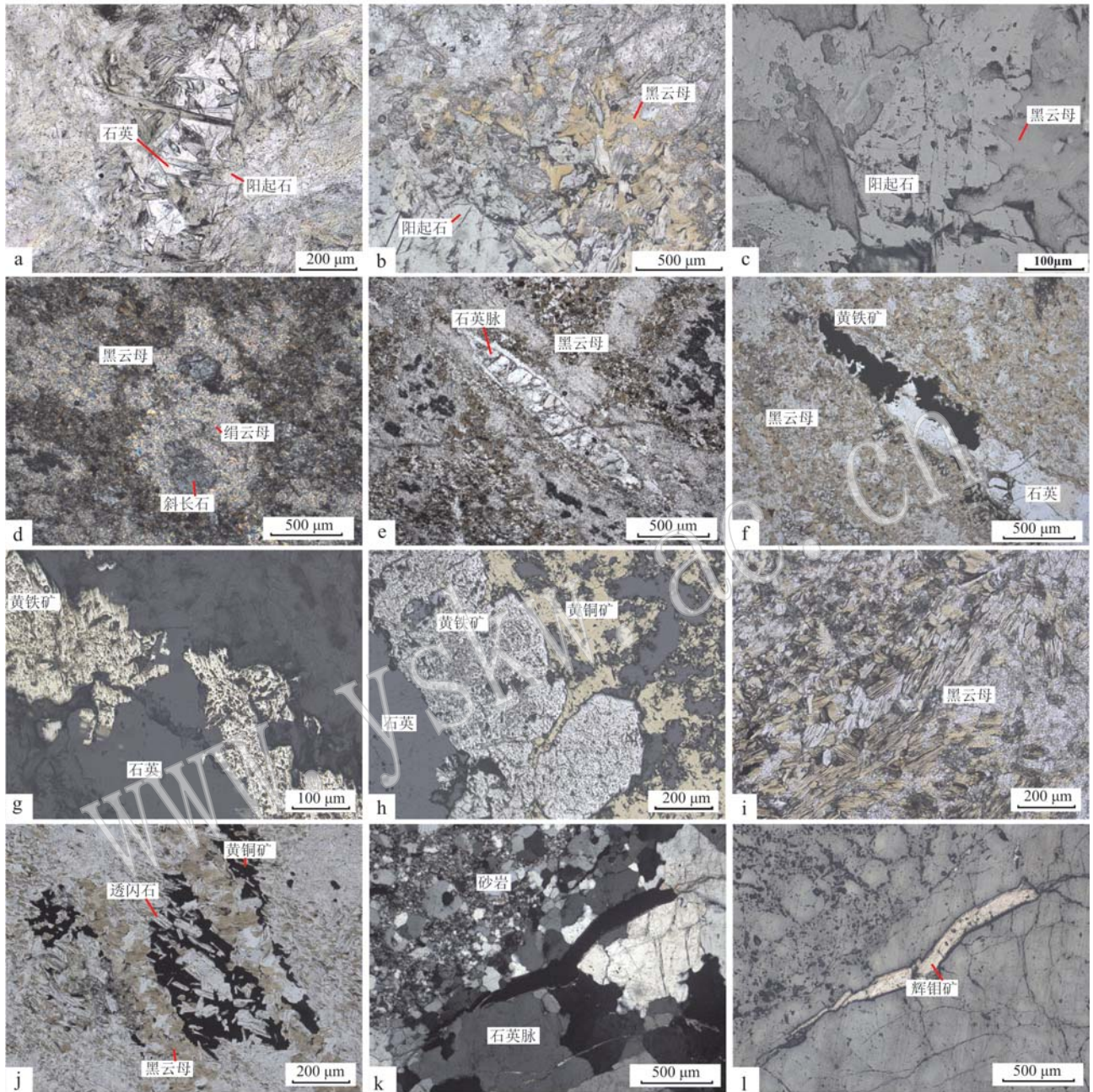


图5 查涌铜多金属矿床典型矿物特征

Fig. 5 Typical mineral characteristics of the Chayong copper polymetallic deposit

a—针状、长柱状阳起石，空间充填石英，单偏光；b—黑云母鳞片状集合体围绕阳起石生长，单偏光；c—热液黑云母溶蚀穿切阳起石，反射光；d—中基性岩脉斜长石残晶和绢云母化，正交偏光；e—石英脉穿入蚀变的中基性岩脉，单偏光；f—石英脉穿入黑云母化的砂岩中，单偏光；g—黄铁矿晚于石英脉，反射光；h—黄铁矿被黄铜矿穿过，反射光；i—角岩中的热液黑云母集合体，自形，一组完全解理，单偏光；j—黄铜矿围绕热液黑云母和透闪石生长，单偏光；k—辉钼矿充填石英脉中裂隙，正交偏光；l—辉钼矿呈细脉状，呈银白色金属光泽，反射光

a—acicular and elongated actinolite, quartz filling the open space, plainlight; b—biotite exhibiting flaky texture, growing around actinolite, plainlight; c—hydrothermal biotite penetrating actinolite, reflected light; d—plagioclase relict crystals and sericitization in intermediate-basic dyke, crossed nicols; e—quartz vein penetrating intermediate-basic dyke, plainlight; f—quartz veinlet penetrating biotitization sandstone, plainlight; g—pyrite occurring later than quartz vein, reflected light; h—pyrite intersected by chalcopyrite, reflected light; i—hydrothermal biotite aggregate in hornfels, euhedral crystal and developing a complete set of cleavage, plainlight; j—chalcopyrite growing around hydrothermal biotite and tremolite, plainlight; k—molybdenite filling fractures of quartz vein, crossed nicols; l—molybdenite veinlet, silver-white metallic luster, reflected light

成矿期 成矿阶段	岩浆热液期	
	硅酸盐阶段	石英-硫化物阶段
透闪石	—	—
阳起石	—	—
黑云母	—	—
绢云母	—	—
石英	—	—
黄铁矿	—	—
黄铜矿	—	—
辉钼矿	—	—
方铅矿	—	—
闪锌矿	—	—
标型元素 (组分)	OH ⁻ 、Ca、Na、Si	Fe、Cu、Mo、Pb、Zn
典型矿物的 结构构造	鳞片状、板状	脉状、浸染状

图 6 查涌铜多金属矿床 Cu 矿化成矿期次 [方铅矿、闪锌矿数据姜和芳(2017)修改]

Fig. 6 Mineralization stage of the Chayong copper polymetallic deposit (galena and shpalerite modified after Jiang Hefang, 2017)

研究院的“游泳池堆”内进行,使用 B4 孔道,中子流密度约为 $2.65 \times 10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。照射总时间为 1 440 min,积分中子通量为 $2.29 \times 10^{18} \text{ n}/\text{cm}^2$;同期接受中子照射的还有用做监控样的 ZBH-25 黑云母标样,其标准年龄为 $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$,K 含量为 7.6%。样品阶段升温加热的详细实验流程依据(陈文等, 2002, 2006; 张彦等, 2006)。

黑云母的电子探针分析在中国冶金地质总局山东局测试中心完成,分析仪器型号为 JEOL(日本电子)JXA-8230 型电子探针显微分析仪,工作电压为 15 kV,工作电流为 10/20 nA,分析束斑 $0 \sim 10 \mu\text{m}$,硅酸盐矿物用 Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K 和 P 元素作为分析标准,标准样品选用美国 SPI 矿物/金属标准和中国国家标准样品 GSB,检出限及标定矿物严格参照中华人民共和国国家标准 GB/T 15617-2002。

4 黑云母矿物化学特征

查涌铜多金属矿床钻孔 ZK6801 中角岩化砂岩中的黑云母电子探针成分分析结果见表 2。黑云母的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 值采用林文蔚等(1994)计算方法获得,以 22 个氧原子作为标准计算黑云母的阳离子数及相关参数。黑云母的 SiO_2 含量变化于 37.90% ~ 41.51% 之间,平均为 39.16%; MgO 含量变化于 15.19% ~ 18.18% 之间,平均为 16.37%; Al_2O_3 含量

变化于 12.11% ~ 15.52% 之间,平均为 14.34%, TiO_2 含量变化于 1.20% ~ 2.38% 之间,平均 1.87%,显示出富镁、铝,贫钛的特征。 CaO 含量较低或低于检测限(0.01%)。

5 同位素年代学特征

5 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试结果见表 3, Re 含量介于 $0.864 \times 10^{-6} \sim 9.624 \times 10^{-6}$ 之间, ^{187}Re 含量介于 $0.543 \times 10^{-6} \sim 6.049 \times 10^{-6}$ 之间, ^{187}Os 含量介于 $1.131 \times 10^{-9} \sim 12.567 \times 10^{-9}$ 之间,普 Os 含量介于 $0.0068 \times 10^{-9} \sim 0.1346 \times 10^{-9}$ 之间。利用 Isoplot 软件处理测得的同位素数据,拟合得到等时线年龄(图 7a),横纵坐标选择参照 Stein 等(2000);模式加权平均年龄见图 7b。从图 7 中可以看出查涌铜多金属矿床的辉钼矿 5 件样品拟合较好,Re-Os 同位素等时线年龄为 $124.75 \pm 0.86 \text{ Ma}$,初始 ^{187}Os 为 0.004 ± 0.015 (MSWD = 0.52),模式年龄加权平均值为 $124.92 \pm 0.86 \text{ Ma}$ 。

在 700 ~ 1 400℃ 温度范围内,对黑云母样品进行了 9 个阶段的释热分析(表 4),其中 870 ~ 1 240℃ 构成的坪年龄为 $129.59 \pm 1.58 \text{ Ma}$ (图 8),对应了 98.15% 的 ^{39}Ar 释放量,相应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄为 $128.57 \pm 1.68 \text{ Ma}$ (MSWD = 34.62), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 317.9 ± 25.4 (图 9a); $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 $129.21 \pm 1.65 \text{ Ma}$ (MSWD = 31.10), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 312.9 ± 24.3 (图 9b)。

6 讨论

6.1 角岩中的黑云母成因

黑云母一般具有岩浆黑云母和热液黑云母等不同成因(傅金宝, 1981)。本次发现的查涌铜多金属矿床角岩中黑云母呈脉状、条带状产出(图 4c);除角岩外,在蚀变岩脉边缘砂岩中可见黑云母呈细鳞片状矿物集合体(图 4a);也可见黑云母 + 黄铜矿细脉,黄铜矿围绕热液黑云母及早阶段的透闪石生长(图 5j),黑云母单矿物呈褐色-黄褐色,具有多色性,自形且发育一组完全解理(图 5i),长轴径长一般为 $100 \mu\text{m}$ 。其矿物特征与傅金宝(1981)描述典型热液黑云母特征一致,以片状或鳞片状集合形式,构

表 2 查涌铜多金属矿床黑云母电子探针分析结果
 Table 2 Electron microprobe analyses of biotite from the Chayong copper polymetallic deposit

组分	ZK6801-1-9-1	ZK6801-9-2	ZK6801-9-3	ZK6801-9-4	ZK6801-9-5	ZK6801-9-6	ZK6801-9-7	ZK6801-9-8	ZK6801-9-9	ZK6801-9-10	ZK6801-9-11	ZK6801-1-9-12	$w_B/\%$
SiO ₂	37.90	38.02	37.96	38.58	39.22	38.48	39.73	39.62	40.22	41.51	39.89	38.74	
TiO ₂	2.10	2.12	2.13	2.38	2.11	1.95	1.78	1.54	1.60	1.20	1.71	1.87	
Al ₂ O ₃	15.52	15.11	15.18	15.14	14.35	14.51	14.32	13.99	13.75	12.11	13.60	14.51	
FeO	13.36	12.75	13.03	13.21	12.54	12.46	12.26	12.05	11.55	10.86	11.97	13.15	
MnO	0.27	0.22	0.19	0.23	0.24	0.19	0.28	0.20	0.14	0.16	0.18	0.23	
MgO	15.19	15.51	15.30	15.60	16.26	16.12	17.02	17.14	17.47	18.18	16.98	15.63	
CaO	0.03	-	-	0.04	0.05	0.01	0.05	0.02	0.05	0.04	-	0.07	
Na ₂ O	0.10	0.12	0.11	0.17	0.15	0.11	0.15	0.14	0.16	0.15	0.14	0.13	
K ₂ O	9.64	9.85	9.80	9.55	9.55	9.95	9.64	9.53	9.62	8.67	9.53	9.44	
F	1.43	1.47	1.52	1.50	1.65	1.66	1.75	1.84	2.00	2.17	1.90	1.56	
Cl	0.13	0.11	0.10	0.11	0.11	0.09	0.11	0.10	0.10	0.09	0.11	0.10	
Total	95.03	94.62	94.65	95.84	95.51	94.80	96.32	95.35	95.77	94.21	95.18	94.74	
Si	5.65	5.69	5.68	5.69	5.79	5.74	5.81	5.85	5.90	6.12	5.89	5.78	
Al ^{IV}	2.35	2.31	2.32	2.31	2.21	2.26	2.19	2.16	2.11	1.88	2.11	2.22	
Al ^{VI}	0.38	0.35	0.36	0.32	0.29	0.30	0.28	0.28	0.27	0.23	0.26	0.33	
Ti	0.24	0.24	0.24	0.26	0.24	0.22	0.20	0.17	0.18	0.13	0.19	0.21	
Fe ³⁺	0.26	0.25	0.26	0.27	0.26	0.24	0.25	0.25	0.24	0.26	0.25	0.27	
Fe ²⁺	1.40	1.34	1.37	1.36	1.29	1.32	1.25	1.24	1.17	1.08	1.23	1.37	
Mn	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	
Mg	3.37	3.46	3.41	3.43	3.57	3.59	3.71	3.77	3.82	4.00	3.74	3.47	
Ca	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	
Na	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	
K	1.83	1.88	1.87	1.80	1.80	1.89	1.80	1.79	1.80	1.63	1.80	1.79	
Total	15.55	15.58	15.56	15.52	15.52	15.61	15.56	15.56	15.54	15.40	15.52	15.52	
Fe ³⁺ + Al ^{VI} + Ti	0.88	0.84	0.86	0.85	0.78	0.75	0.72	0.69	0.69	0.62	0.70	0.81	
Fe ²⁺ + Mn	1.44	1.37	1.40	1.39	1.32	1.34	1.29	1.27	1.19	1.10	1.25	1.40	

表 3 查涌铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 3 Re-Os isotope data of molybdenite from the Chayong copper polymetallic deposit

原样名	样重/g	$w(\text{Re})/10^{-6}$		$w(\text{普 Os})/10^{-9}$		$w(^{187}\text{Re})/10^{-6}$		$w(^{187}\text{Os})/10^{-9}$		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
ZK6801-1-1	0.005 26	8.248	0.060	0.096 4	0.088 1	5.184	0.037	10.763	0.07	124.5	1.7
ZK6801-1-3	0.050 94	9.624	0.090	0.006 8	0.010 1	6.049	0.057	12.567	0.08	124.6	1.9
ZK6801-1-4	0.030 28	8.638	0.084	0.065 8	0.033 7	5.429	0.053	11.354	0.08	125.4	1.9
ZK6801-1-5	0.030 24	0.864	0.008	0.134 6	0.015 1	0.543	0.050	1.131	0.01	124.8	2.0
ZK6801-1-6	0.030 21	1.047	0.013	0.016 0	0.007 9	0.658	0.008	1.379	0.01	125.6	2.2

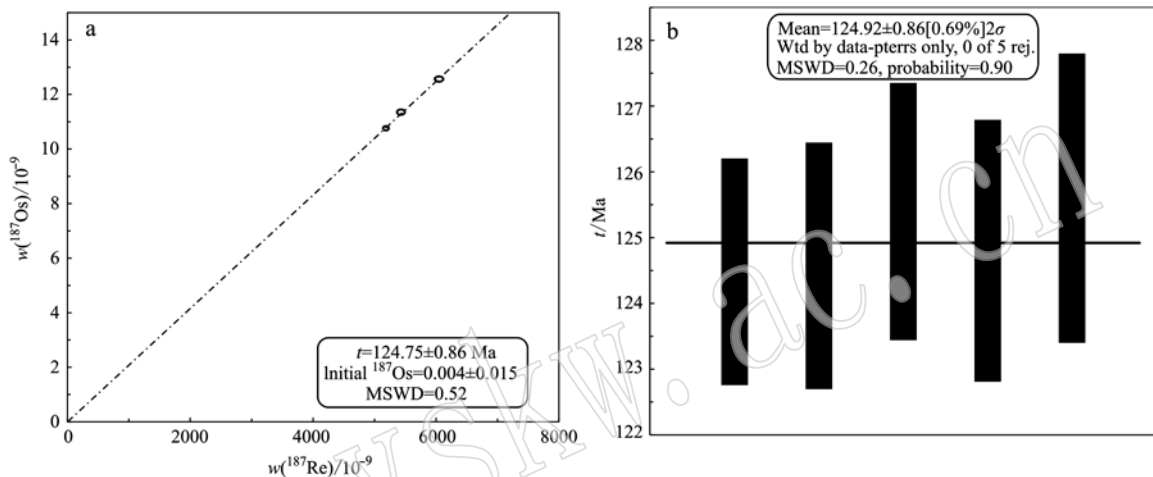


图 7 查涌铜多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 等时线(a)和 Re-Os 模式年龄(b)

Fig. 7 Re-Os isochron (a) and Re-Os model age (b) of molybdenites from Chayong copper polymetallic deposit

表 4 查涌铜多金属矿床黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温测年数据

Table 4 ⁴⁰Ar/³⁹Ar stepwise heating analytical data for biotite from the Chayong copper polymetallic deposit

温阶	³⁶ Ar[V]	³⁷ Ar[V]	³⁸ Ar[V]	³⁹ Ar[V]	⁴⁰ Ar[V]	⁴⁰ Ar [*] / ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar(r)/%	³⁹ Ar(k)/%	$t \pm 2\sigma/\text{Ma}$
870℃	0.011 7	0.046 6	0.006 2	0.201 4	8.817 5	26.641 1	60.84	3.84	131.39 ± 1.18
920℃	0.005 2	0.019 3	0.008 3	0.371 7	11.458 5	26.723 0	86.68	7.09	131.78 ± 0.53
970℃	0.001 6	0.000 0	0.006 1	0.294 5	8.326 1	26.676 2	94.36	5.62	131.56 ± 0.51
1 020℃	0.002 3	0.037 3	0.013 6	0.671 0	18.334 7	26.316 0	96.30	12.81	129.84 ± 0.43
1 070℃	0.003 1	0.006 7	0.029 2	1.468 4	39.758 4	26.440 0	97.65	28.03	130.43 ± 0.41
1 100℃	0.001 4	0.017 8	0.014 8	0.741 1	19.706 6	26.013 9	97.83	14.15	128.40 ± 0.43
1 140℃	0.001 3	0.022 9	0.013 7	0.682 9	18.146 8	26.014 3	97.89	13.04	128.40 ± 0.42
1 180℃	0.001 2	0.023 0	0.010 8	0.528 7	14.050 7	25.910 1	97.50	10.09	127.91 ± 0.45
1 240℃	0.000 5	0.000 0	0.003 8	0.182 2	4.907 5	26.052 5	96.73	3.48	128.59 ± 0.80

成细脉分布在蚀变岩中。角岩中黑云母电子探针数据结果显示,其 TiO₂ 含量为 1.20% ~ 2.38%, Al₂O₃ 含量为 12.11% ~ 15.52% (表 2), Al₂O₃/TiO₂ 值介于 6.36 ~ 10.09 之间,远高于岩浆黑云母的比值 (Al₂O₃/TiO₂ 值多数小于 3.5) (傅金宝, 1981)。据 Foster(1960)云母类型判别图解,角岩中的黑云母 Mg-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn)的投点落在

镁质黑云母范围内(图 10)。因此,本次研究的黑云母应为热液成因的镁质黑云母。

研究表明,Ti 的含量可以用来作为黑云母结晶温度的指示剂(Henry *et al.*, 2005)。根据 Ti-Mg/(Mg+Fe)图解,估算得到查涌铜多金属矿床角岩中黑云母的结晶温度介于 630 ~ 710℃ 之间(图 11)。进一步计算角岩中黑云母的 Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg)值发

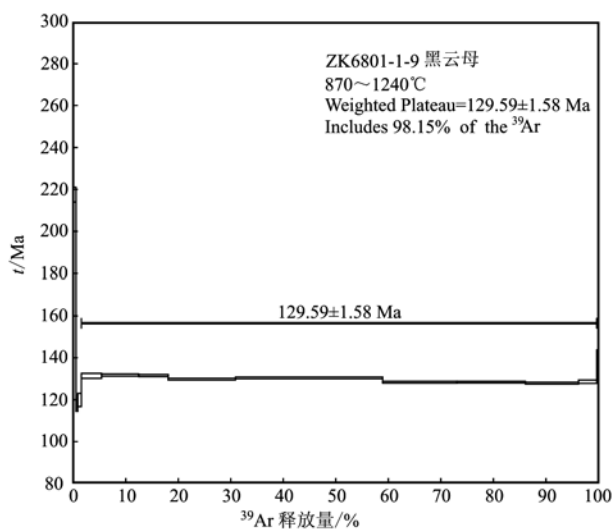


图8 查涌铜多金属矿床黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄
Fig. 8 ^{40}Ar - ^{39}Ar age spectrum of biotite from the Chayong copper polymetallic deposit

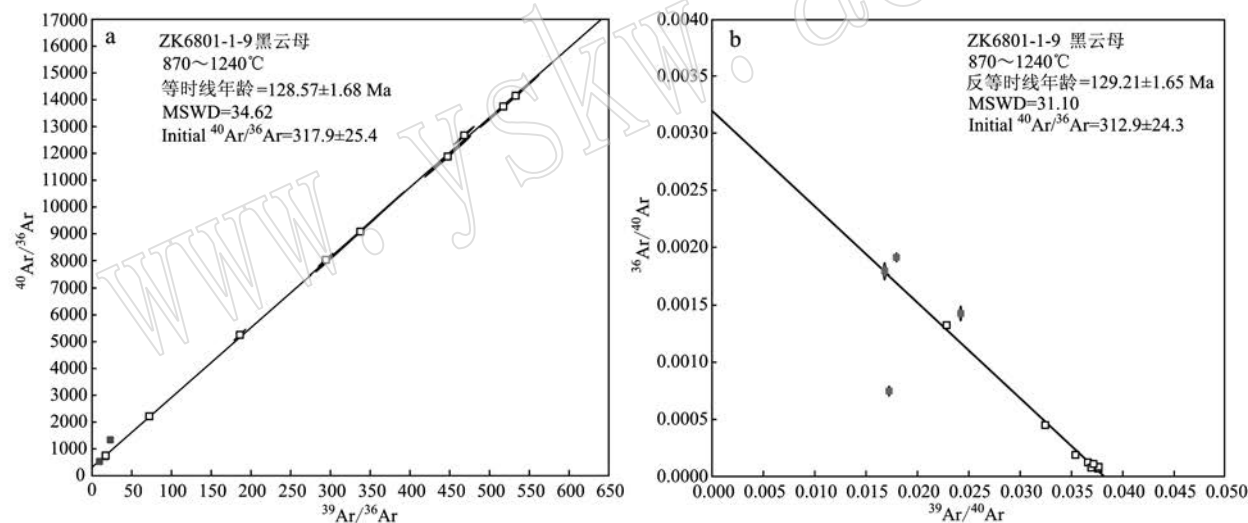


图9 查涌铜多金属矿床黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 等时线图(a)和反等时线年龄图(b)
Fig. 9 ^{40}Ar - ^{39}Ar isochron (a) and inverse isochron (b) of biotite from the Chayong copper polymetallic deposit

6.3 成矿年代

根据上述讨论,本次研究的查涌矿床角岩化砂岩中的细脉状、自形的黑云母为热液黑云母,可见黄铜矿围绕其生长(图5g),且未受到后期热液流体的改造,因此,它有效的Ar-Ar同位素年龄有两个地质意义:其一限定了围绕黑云母生长的黄铜矿成矿年龄;其二则指示控制热液黑云母形成的岩浆作用的上限年龄。进一步同位素测年工作表明,黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄与相应的等时线年龄和反等时线年龄在误差范围内是一致的, ^{40}Ar - ^{36}Ar 初始比值为

现,该比值集中在0.213~0.294之间,均值为0.263,较为均一,可以判定角岩中热液黑云母并未遭受后期流体的改造(Stone, 2000; 李鸿莉等, 2007; 刘彬等, 2010; 王崴平等, 2012; 沈阳等, 2018)。

6.2 辉钼矿Re含量与成矿物质来源

Lambert等(1994)认为Re-Os同位素体系对硫化物的形成具有很强的示踪作用,并且对成矿过程中地壳物质的混入程度具有高度灵敏的指示作用。Mao等(1999)通过对比中国各类型的钼矿床中辉钼矿Re的含量,认为辉钼矿的Re含量可以从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ ($1 < n < 10$)的数量级变化,对应成矿物质具有幔源-壳幔混源-壳源的区别。对比参照查涌铜多金属矿床中5件辉钼矿样品,其Re含量介于 $0.864 \times 10^{-6} \sim 9.624 \times 10^{-6}$ 之间,指示矿床成矿物质具有壳源属性。

312.9 ± 24.3 ,与现代大气氩同位素比值(298.56 ± 0.31 ; Lee *et al.*, 2006)在误差范围内基本一致,因此认为黑云母形成后没有捕获过剩氩,测得的黑云母坪年龄129 Ma可以代表其最终形成时的地质热事件年龄。因此,查涌矿床黄铜矿化的年龄应略晚于129 Ma,而导致热液黑云母形成的岩浆作用时间将早于129 Ma。这一结果和矿区出露的花岗闪长岩、石英闪长岩、辉长岩的成岩年代均不相同(Yang *et al.*, 2011; Roger *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2012; Spurlin *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2014),因此推测深

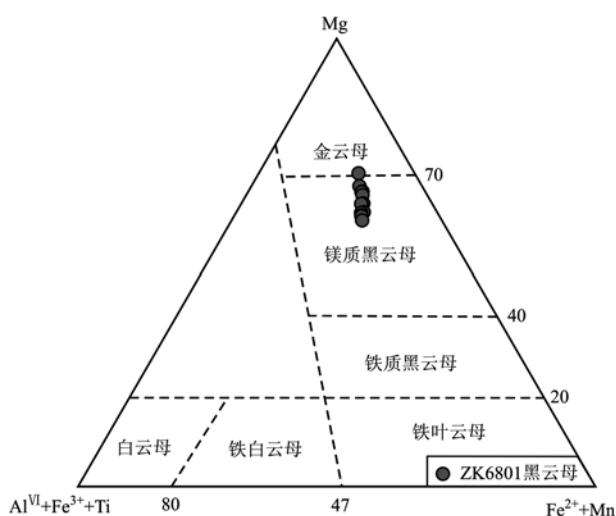


图 10 查涌铜多金属矿床黑云母分类图解(底图据 Foster, 1960)

Fig. 10 Classification of mica from the Chayong copper polymetallic deposit (base diagram after Foster, 1960)

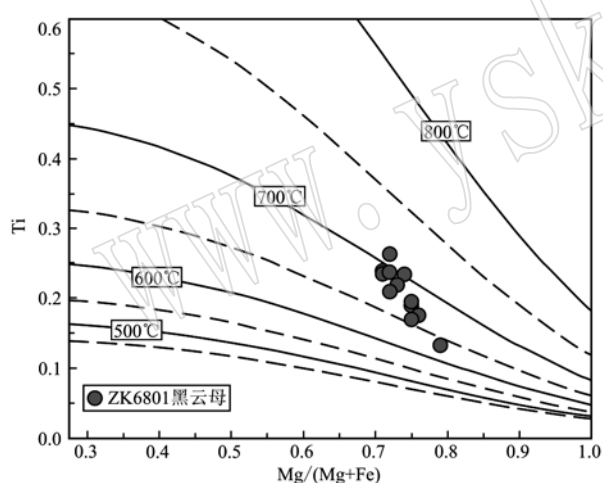


图 11 基于黑云母 Ti 和 $Mg/(Mg + Fe)$ 值的等温线图 (底图据 Henry *et al.*, 2005)

Fig. 11 Temperature isotherms calculated from the equation on Ti - $Mg/(Mg + Fe)$ diagram (base diagram after Henry *et al.*, 2005)

部存在隐伏岩体,与其相关的热液作用控制了 Cu 铅锌矿化的形成,这和前人认识(张万辉等, 2017)一致。

根据野外地质观测和显微镜下矿相学观察,本次研究的辉钼矿发育在黑云母化及黄铜矿化之后(图 4e、图 5k)。5 件辉钼矿测得 Re-Os 同位素等时线年龄为 124.75 ± 0.86 Ma, Re-Os 模式年龄在 124.5 ± 1.7 Ma ~ 125.6 ± 2.2 Ma, 在误差范围内一

致。对于年轻的辉钼矿, Re-Os 体系的解耦现象对辉钼矿的 Re-Os 体系影响很小(杜安道等, 2007; 李超等, 2012), 且由于辉钼矿 Re-Os 体系的封闭温度约为 500°C (Suzuki *et al.*, 1996), 相较于全岩和矿物的 Rb-Sr、K-Ar 体系, 前者更不易受到后期岩浆活动和热液作用的干扰, 其继承辉钼矿核、普通 Os 的干扰以及放射性 Os 的丢失对辉钼矿的定年结果影响非常微小, 所以辉钼矿的定年结果可以精确地代表成矿事件的年龄(Stein *et al.*, 2001)。因此, 此次获得的 Re-Os 等时线年龄可以精确地厘定查涌矿床的辉钼矿化发生在 124 Ma 左右。

综合上述讨论, 查涌矿床石英硫化物阶段的黄铜矿化应在 129 ~ 124 Ma 之间, 辉钼矿化发生在 124 Ma, 其发育顺序和地质观察获得的认识一致。两阶段矿化事件时间相差极小, 表明查涌矿区 Cu、Mo 矿化受到同期岩浆热液作用的控制。

6.4 对区域岩浆作用和成矿作用的指示意义

对查涌铜多金属矿床的成矿年代学研究工作表明, 该矿床的 Cu、Mo 矿化发育在早白垩世的 129 ~ 124 Ma, 成矿作用受到了深部隐伏岩体的控制, 成矿物质主要来自壳源岩浆。本次研究为区域成矿作用和岩浆作用的发育规律都带来了新的启示。在区域成矿作用方面, 本次工作明确表明了“三江”成矿带多彩矿集区内新近发现的与岩浆热液作用有关的铜多金属矿床发育在早白垩世, 其成矿作用与区域上新世代碰撞造山岩浆作用相关矿化无关[如纳日贡玛斑岩铜矿(43 Ma)等, 杨志明等, 2008], 是一套新的构造背景下的铜多金属成矿系统, 而对这一新的成矿背景的探索将是明确这套成矿系统区域成矿规律的第一步工作。同时, 由于查涌铜多金属矿床与多彩矿集区内火山成因的矿床具有极为相似的地质特征, 但火山成因矿床没有厘定准确成矿年龄, 因此, 原认为是火山成因矿床的成因、成岩成矿年代需要深化研究。在区域岩浆作用方面, 区域上广泛发育的岩浆岩成岩时代为三叠纪到早侏罗世(Roger *et al.*, 2003; 金贵善, 2006; 王秉璋等, 2008)和始新世(Spurlin *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2014), 本次获得的查涌铜多金属矿床的成矿年龄则表明“三江”带存在早白垩世岩浆-成矿作用, 这期岩浆作用可能具有较大的成矿潜力。因此, 对早白垩世岩浆岩的研究将成为指导“三江”成矿带矿产勘查评价的新方向。

7 结论

查涌铜多金属矿床在石英硫化物阶段形成黄铜矿化和辉钼矿化。角岩中的黑云母为热液成因镁质黑云母,其 Ar-Ar 同位素年龄为 129.59 ± 1.58 Ma; 穿切黄铜矿的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 124.75 ± 0.86 Ma, Re 具有壳源特征。黑云母蚀变年龄和辉钼矿成矿年龄相近,认为“三江”成矿带中北段多彩矿集区新近发现的与岩浆热液作用有关的铜多金属成矿系统形成于早白垩世。因此,对早白垩世岩浆岩研究和矿产勘查评价将开启“三江”成矿带中北段矿产勘查的一个新的方向。

致谢 野外工作得到了青海省有色地质矿产勘查局地质矿产勘查院张万辉工程师等工作人员的大力支持,得到了中国地质大学(北京)周梦林硕士和中国地质科学院地质研究所任家辉硕士的全力协助,国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室周利敏老师、中国冶金地质总局山东局测试中心和中国地质科学院地质研究所 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学实验室相关老师帮助完成了 Re-Os 同位素、电子探针、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素的测试分析工作,在此一并表示感谢。

References

- Cao Chenggang, Hang Yingshan, Yang Hongwei, *et al.* 2014. Analysis of metallogenic geological characteristics and prospecting prospects in middle and upper mining area of Longmogou deposit, Zhiduo County, Qinghai Province[J]. West-China Exploration Engineering, (8): 125 ~ 128 (in Chinese).
- Chen Wen, Liu Xinyu and Zhang Sihong. 2002. Continuous laser step-wise heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique[J]. Geological Review, 48 (s1): 127 ~ 134 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, *et al.* 2006. Late episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau—Evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 867 ~ 872 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuhua, Wen Xuefeng, Song Luxi, *et al.* 2011. Geological characteristics and prospecting analysis on Galonggema copper lead-zinc deposit in Qinghai[J]. Mineral Exploitation, 2(4): 369 ~ 375 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, *et al.* 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys[J]. Mineral Deposits, 29(1): 37 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Yang Liqiang and Wang Changming. 2011. Research advances of superimposed orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethys [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2 501 ~ 2 509 (in Chinese with English abstract).
- Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, *et al.* 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites [J]. Acta Geologica Sinica, 68(4): 339 ~ 347 (in Chinese with English abstract).
- Du Andao, Qu Wenjun, Li Chao, *et al.* 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques[J]. Rock And Mineral Analysis, 28(3): 288 ~ 304 (in Chinese with English abstract).
- Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, *et al.* 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite[J]. Mineral Deposits, 26(5): 572 ~ 580 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. U. S. Geol. Survey. Pro. Paper, 354: 11 ~ 49.
- Fu Jinbao. 1981. Chemical composition of biotite in porphyry copper deposits[J]. Geology and Prospecting, 9(1): 16 ~ 49 (in Chinese).
- Henry D J, Guidotti C V and Thomson J A. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. American Mineralogist, 90: 316 ~ 328.
- Hou Zengqian. 1991. The evolution of Yidun island-arc and implications in the exploration of Kuroko-type volcanogenic massive sulphide deposits in Sangjiang area, China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 16(2): 153 ~ 164 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian. 2003. Re-Os dating of sulfides from the volcanogenic massive sulfide deposit at Gacun, Southwestern China [J]. Resource Geology, 53(4): 305 ~ 310.
- Hou Zengqian. 2004. Porphyry Cu-Mo-Au deposits: Some new insights and advances[J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 131 ~ 144 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. Mineral Deposits, 25(5): 521 ~ 543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, *et al.* 2008. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model [J]. Mineral Deposits, 27(2): 123 ~ 144 (in Chinese with English abstract).

- Hou Zengqian, Xie Yuling, Xu Wenyi, *et al.* 2006. Yulong Deposit, Eastern Tibet: A high-dulfidation Cu-Au porphyry copper deposit in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *International Geology Review*, 49(3): 235 ~ 258.
- Hou Zengqian, Zaw K, Pan Guitang, *et al.* 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S. W. China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1): 48 ~ 87.
- Hou Zengqian, Zhong Dalai and Deng Wanming. 2004. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenic belts on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 31(1): 1 ~ 14(in Chinese).
- Jiang Hefang. 2017. Study on the Geological Characteristics and Enrichment Regularities of Mineralization of Chayong Cu Polymetallic Deposit, Yushu, Qinghai Province(Master Degree Thesis)[D]. Jilin: Jilin University, 1 ~ 73(in Chinese with English abstract).
- Jin Guihai. 2018. Geological characteristics and prospecting potential of the multi day lead-zinc deposit in Zhi Duo Country, Qinghai [J]. *Prospecting Technology*, 10: 94 ~ 96 (in Chinese with English abstract).
- Jin Guishan. 2006. Geochronology and Geochemistry Characters on Some Magmatic Rocks in the West of Xijir Ulan-Jinshajiang Suture Zone (Master Degree Thesis)[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1 ~ 95(in Chinese with English abstract).
- Lambert D D, Walker R J, Morgan J W, *et al.* 1994. Re-Os and Sm-Nd isotope geochemistry of the Stillwater Complex, Montana: Implications for the petrogenesis of the J-M Reef[J]. *Journal of Petrology*, 35(6): 1 717 ~ 1 753.
- Lee J Y, Marti K, Severinghaus J P, *et al.* 2006. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(17): 4 507 ~ 4 512.
- Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao, *et al.* 2012. Study on Re-Os isotope in molybdenite containing common Os[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 702 ~ 708(in Chinese with English abstract).
- Li Hongli, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, *et al.* 2007. Mineral chemistry of biotite in the Qitianling granite associated with the Furong tin deposit: Tracing tin mineralization signatures[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 605 ~ 2 614(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenwei and Peng Lijun. 1994. The estimation of Fe³⁺ and Fe²⁺ contents in amphibole and biotite from EMPA data[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 155 ~ 162(in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Liu Yuanyuan, *et al.* 2010. Mineral chemistry of biotites from the Tongshankou Cu-Mo deposit: Implication for petrogenesis and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(2): 151 ~ 165(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingchao, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2011. Formation of the Dongmohazhua Pb-Zn deposit in the thrust-fold setting of the Tibetan Plateau, China: Evidence from fluid inclusion and stable isotope data[J]. *Resource Geology*, 61(4): 383 ~ 406.
- Liu Yingchao, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2016. Geology and chronology of the Zhaofayong carbonate-hosted Pb-Zn ore cluster: Implication for regional Pb-Zn metallogenesis in the Sanjiang belt, Tibet [J]. *Gondwana Research*, 35: 15 ~ 26.
- Liu Yingchao, Kendrick M A, Hou Zengqian, *et al.* 2017. Hydrothermal fluid origins of carbonate-hosted Pb-Zn deposits of the Sanjiang thrust belt, Tibet: Indication from noble gases and halogens[J]. *Economic Geology*, 112(5): 1 247 ~ 1 268.
- Liu Zengqian. 1993. Division of Tectono-Magmatic Zones and the Distribution of Deposits in the Sanjiang Area (Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 248 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shiyin, Zhang Qilong, Zhang Yao, *et al.* 2014. Geological characteristics and prospecting of polymetallic ore of Dangjiang Copper, Zhiduo County of Qinghai Province[J]. *Gansu Metallurgy*, 36(2): 61 ~ 65 (in Chinese with English abstract).
- Ma Bingchun, Gou Mingliang and Chen Bingfang. 2018. Geological characteristics and prospecting indicators of copper deposits in Dangjiang Area, Zhiduo County, Qinghai Province[J]. *Prospecting Technology*, 15: 71 ~ 73 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xiaoguang, Cai Yongji, Ma Guocai, *et al.* 2018. Study on the characteristics and metallogenic model of Sanalongwa polymetallic deposit in Qinghai province[J]. *Mineral Exploration*, 9(6): 1 073 ~ 1 077 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng, *et al.* 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11/12): 1 815 ~ 1 818.
- Mo Xuanxue. 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 269 (in Chinese with English abstract).
- Qi Yongai, Zhao Junfang and Gao Lie. 2018. The understanding and summary of the metallogenic regularity in the colorful area of Qinghai Province[J]. *Mineral Resource*, (10): 135 ~ 137(in Chinese with English abstract).
- Roger F, Arnaud N, Gilder S, *et al.* 2003. Geochronological and geochemical constraints on Mesozoic suturing in east central Tibet [J]. *Tectonics*, 22(4): 11 ~ 20.
- Roger F, Tapponnier P, Arnaud N, *et al.* 2000. An Eocene magmatic

- belt across central Tibet: Mantle subduction triggered by the Indian collision? [J]. *Terra Nova*, 12(3): 102 ~ 108.
- Shen Guichun, Xie Wanhong, Wang Yidian, *et al.* 2013. The geological feature of Longmogou Cu multimetallic deposit, Qinghai [J]. *Yunnan Geology*, 32(2): 150 ~ 153 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yang, Zheng Yuanchuan, Ma Rui, *et al.* 2018. Mineralogical characteristics of hornblendes and biotites in ore-forming porphyry from Machangqing Cu-Mo deposit in Yunnan Province and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 797 ~ 815 (in Chinese with English abstract).
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, *et al.* 2011. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: characteristics and genetic types [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 255 ~ 380 (in Chinese with English abstract).
- Song Yucai, Yang Tiannan, Zhang Hongrui, *et al.* 2015. The Chaqu-pacha Mississippi Valley-type Pb-Zn deposit, central Tibet: Ore formation in a fold and thrust belt of the India-Asia continental collision zone [J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 533 ~ 545.
- Spurlin M S, Yin An, Horton B K, *et al.* 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syn-collisional igneous activity, east-central Tibet [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9): 1 293 ~ 1 317.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J L, *et al.* 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works [J]. *Terra Nova*, 13(6): 479 ~ 486.
- Stein H J, Morgan J W and Schersten A. 2000. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) Sulfides: The Harnas Gold Deposit, Southwest Sweden, records continental-scale tectonic events [J]. *Economic Geology*, 95(8): 1 657 ~ 1 671.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, *et al.* 1998. Re-Os ages for Archaean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting [J]. *Mineralium Deposita*, 33: 329 ~ 345.
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River Area, Northwest Superior Province, Ontario, Canada [J]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 455 ~ 470.
- Sun Maoyu, Qu Huanchun, Li Qiuyun, *et al.* 2015. Recognition of the ore-forming porphyry in the Yulong Cu deposit and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 493 ~ 504 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaoming, Zhang Yan, Xiong Dexing, *et al.* 2009. Crust and mantle contributions to gold-forming process at the Daping deposit, Ailaoshan gold belt, Yunnan, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1 ~ 3): 235 ~ 249.
- Suzuki K, Shimizu H, Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(16): 3 151 ~ 3 159.
- Wang Bingzhang, Luo Zhaohua, Zheng Xiaoping, *et al.* 2008. Indosinian granitoids in the Zhidoi area in the northern segment of the Sangjiang belt, Qinghai: Their petrogenesis and zircon U-Pb dating [J]. *Geology in China*, 35(2): 196 ~ 206 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Tang Juxing, Gu Xuexiang, *et al.* 2001. Preliminary analysis on Himalayan tectonic-metallogenetic domain and its mineralization effect [J]. *J. Mineral. Petrol.*, 21(3): 146 ~ 152 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fei. 2017. Study on the Geological Characteristics and Enrichment Regularities of Mineralization of Sanalongwa Copper Deposit, Yushu City, Qinghai Province (Master Degree Thesis) [D]. Jilin: Jilin University, 1 ~ 79 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fenglin, Zhan Xiaofei, Tan Jun, *et al.* 2017. Characteristics of ore-forming fluids from the Chayong copper-polymetallic deposit in the north of Sanjiang metallogenic belt: Fluid inclusion and H-O isotope evidence [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 32(1): 15 ~ 23 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian. 2017. Study on Metallogenesis of Cu Pb Zn Deposits in Duocai Region in the Northern Segment of the Sanjiang Metallogenic belt (Ph. D. Dissertation) [D]. Jilin: Jinlin University, 1 ~ 173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Sun Fengyue, Jiang Hefang, *et al.* 2018. Age, petrogenesis and tectonic implications of high-Mg diorite in Chayong Region, Yushu, Qinghai [J]. *Earth Science*, 43(3): 733 ~ 752 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Sun Fengyue, Yu Lu, *et al.* 2017. Fluid inclusion and H-O-S-Pb isotope systematics of the Galonggema Cu Deposit in Yushu, Qinghai Province [J], China. *Earth Science*, 42(6): 941 ~ 956 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weiping, Tang Juxing and Ying Lijuan. 2012. Mineral chemical characteristics of biotites from hornfels in the Jiama (Gyama) polymetallic copper deposit of Tibet and their geological significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 444 ~ 458 (in Chinese with English abstract).
- Xin Tianguai, Zhao Shaoqing, Yang Wenlong, *et al.* 2014. Geology and assessment of prospecting potential of Galonggema copper-polymetallic deposit in the South of Qinghai Province [J]. *Geological Science and*

- Technology Information, 33(3): 145 ~ 153 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tiannan, Hou Zengqian, Wang Yu, *et al.* 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution of northeast Tibet: Evidence from the Triassic composite western Jinsha-Garze-Litang suture[J]. *Tectonics*, 31(TC4004): 1 ~ 20.
- Yang Tiannan, Zhang Hongrui, Liu Yanxue, *et al.* 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry[J]. *Chemical Geology*, 284(3 ~ 4): 270 ~ 282.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Xu Jifeng, *et al.* 2014. Geology and origin of the post-collisional Narigongma porphyry Cu-Mo deposit, southern Qinghai, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 26(2): 536 ~ 556.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2008. Genesis of porphyries and tectonic controls on the Narigongma porphyry Mo(-Cu) deposit, southern Qinghai[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 489 ~ 502 (in Chinese with English abstract).
- Yin An and Harrison T. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibet orogeny[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211 ~ 280.
- Yu Lu. 2017. Study on the Geology Characteristics and Ore Genesis of Galonggema Cu Polymetallic Deposits, Yushu, Qinghai Province (Master Degree Thesis)[D]. Jilin: Jinlin University, 1 ~ 72 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fei, Wei Junhao, Wang Fenglin, *et al.* 2017. Geological features and tectonic setting of volcanogenic copper-polymetallic deposits in Zhiduo-Yushu area, northern Sanjiang Region[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(1): 140 ~ 151 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanhui, Wu Yuanan, Lei Zhendong, *et al.* 2017. Geological characteristics and genetic analysis of the metallogenic mineralization of Chayong copper polymetallic ore in Zhiduo, Qinghai Province[J]. *World Nonferrous Metals*, (15): 136 ~ 139 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yan, Chen Wen, Chen Kelong, *et al.* 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ^{39}Ar recoil loss—Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. *Geological Review*, 52(4): 556 ~ 561 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chenglong, Li Zhengdong, Chen Yuhua, *et al.* 2013. Discussion on the geological-geochemical characteristics and prospecting of copper-polymetallic deposit in Chayong area, Qinghai Province[J]. *Gold Science and Technology*, 21(5): 34 ~ 39 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shaoqing, Fu Lebing, Wei Junhao, *et al.* 2015. Petrogenesis and geodynamic setting of Late Triassic quartz diorites in Zhiduo area, Qinghai Province[J]. *Earth Science*, 40(1): 61 ~ 76 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zongxue, Wang Xuchun and Qin Zeli. 2012. Study of the geological characteristics and metallogenetic model of Galonggema copper polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. *Gold Science and Technology*, 20(1): 66 ~ 70 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹成刚, 韩英善, 杨洪伟, 等. 2014. 青海省治多县多彩龙墨沟中上游矿区成矿地质特征及找矿前景分析[J]. *西部探矿工程*, 8: 125 ~ 128.
- 陈文, 刘新宇, 张思红. 2002. 连续激光阶段升温 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 地质年代测定方法研究[J]. *地质论评*, 48(s1): 127 ~ 134.
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 等. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 22(4): 867 ~ 872.
- 陈玉华, 文雪峰, 宋录西, 等. 2011. 青海尕斯库勒铜铅锌矿区成矿地质特征及找矿前景分析[J]. *矿产勘查*, 2(4): 369 ~ 375.
- 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 等. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用[J]. *矿床地质*, 29(1): 37 ~ 42.
- 邓军, 杨立强, 王长明. 2011. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 27(9): 2 501 ~ 2 509.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 等. 1994. 辉钼矿的铷-锶同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 68(4): 339 ~ 347.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 等. 2009. 铷-锶同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. *岩矿测试*, 28(3): 288 ~ 304.
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 2007. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象[J]. *矿床地质*, 26(5): 572 ~ 580.
- 傅金宝. 1981. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. *地质与勘探*, 9(1): 16 ~ 49.
- 侯增谦. 2004. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿产: 新认识与新进展[J]. *地学前缘*, 11(1): 131 ~ 144.
- 侯增谦, 莫宣学. 1991. 义敦岛弧的形成演化及其对“三江”地区块状硫化物矿床的控制作用[J]. *地球科学*, 16(2): 153 ~ 164.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(5): 521 ~ 543.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. *矿床地质*, 27(2): 123 ~ 144.

- 侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 2004. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J]. 中国地质, 31(1): 1~14.
- 姜和芳. 2017. 青海玉树查涌铜多金属矿床地质特征及矿化富集规律(硕士学位论文)[D]. 吉林大学, 1~73.
- 金贵海. 2018. 青海省治多县多日茸铅锌矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 找矿技术, 10: 94~95.
- 金贵善. 2006. 西金乌兰-金沙江缝合带西段部分岩浆岩地质年代学及地球化学特征(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质科学院, 1~85.
- 李超, 屈文俊, 杜安道, 等. 2012. 含有普通钷的辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 28(2): 702~708.
- 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 2007. 芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩黑云母矿物化学组成及其对锡成矿的指示意义[J]. 岩石学报, 23(10): 2 605~2 614.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. 长春地质学院学报, 24(2): 155~162.
- 刘彬, 马昌前, 刘园园, 等. 2010. 鄂东南铜山口铜(钼)矿床黑云母矿物化学特征及其对岩石成因与成矿的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 29(2): 151~165.
- 刘增乾. 1993. 三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律[M]. 地质出版社, 1~248.
- 卢世银, 张启龙, 张尧, 等. 2014. 青海省治多县当江铜多金属矿地质特征及找矿前景[J]. 甘肃冶金, 36(2): 62~65.
- 马炳春, 缙明亮, 陈秉芳. 2018. 青海省治多县当江地区铜矿床地质特征与找矿标志研究[J]. 找矿技术, 15: 71~72.
- 马晓光, 才吉永, 马国财, 等. 2018. 青海撒纳龙哇铜多金属矿床特征及成矿模式研究[J]. 矿产勘查, 9(6): 1 073~1 077.
- 莫宣学. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1~269.
- 祁永爱, 赵俊芳, 高丽娥. 2018. 青海省多彩地区成矿规律认识及总结[J]. 世界有色金属, (10): 136~137.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钷地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254~257.
- 沈贵春, 谢万洪, 王一点, 等. 2013. 青海龙墨沟铜多金属矿地质特征[J]. 云南地质, 32(2): 150~153.
- 沈阳, 郑远川, 马睿, 等. 2018. 云南马厂箐铜钼矿成矿岩体的角闪石和黑云母矿物学特征及其意义[J]. 矿床地质, 37(4): 797~815.
- 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 等. 2011. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 355~380.
- 孙茂好, 曲焕春, 李秋耘, 等. 2015. 西藏玉龙铜矿床成矿斑岩的厘定及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(4): 493~504.
- 王秉璋, 罗照华, 曾小平, 等. 2008. 青海三江北段治多地区印支期花岗岩的成因及锆石 U-Pb 定年[J]. 中国地质, 35(2): 196~206.
- 王成善, 唐菊兴, 顾雪祥, 等. 2001. 喜马拉雅构造-成矿域及其成矿效应初步分析[J]. 矿物岩石, 21(3): 146~152.
- 王飞. 2017. 青海玉树撒纳龙哇铜矿床地质特征及矿化富集规律(硕士学位论文)[D]. 吉林大学, 1~78.
- 王凤林, 詹小飞, 谭俊, 等. 2017. 三江北段查涌铜多金属矿床成矿流体特征——流体包裹体及氢氧同位素证据[J]. 地质找矿论丛, 32(1): 15~23.
- 王键. 2017. 三江成矿带北段多彩地区铜铅锌矿床成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 吉林大学, 1~173.
- 王键, 孙丰月, 姜和芳, 等. 2018. 青海玉树查涌地区高镁闪长岩年龄、岩石成因及构造背景[J]. 地球科学, 43(3): 733~752.
- 王键, 孙丰月, 禹禄, 等. 2017. 青海玉树尕龙格玛 VMS 型矿床流体包裹体及 H-O-S-Pb 同位素特征[J]. 地球科学, 42(6): 941~956.
- 王威平, 唐菊兴, 应立娟. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床角闪岩中黑云母矿物化学特征及地质意义[J]. 地球学报, 33(4): 444~458.
- 辛天贵, 赵少卿, 杨文龙, 等. 2014. 青海南部尕龙格玛铜多金属矿床地质特征及找矿潜力评价[J]. 地质科技情报, 33(3): 145~153.
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2008. 青海纳日贡玛斑岩钼(铜)矿床: 岩石成因及构造控制[J]. 岩石学报, 24(3): 489~502.
- 禹禄. 2017. 青海玉树尕龙格玛铜多金属矿床地质特征及成因研究(硕士学位论文)[D]. 吉林大学, 1~72.
- 张飞, 魏俊浩, 王凤林, 等. 2017. 三江北段治多-玉树地区火山成因铜多金属矿床地质特征及成矿构造环境[J]. 地质科技情报, 36(1): 140~151.
- 张万辉, 吴远安, 雷震东, 等. 2017. 青海治多县查涌铜多金属矿成矿地质特征及成因分析[J]. 世界有色金属, (15): 136~139.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 等. 2006. 成岩混层(I/S) Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 p-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556~561.
- 赵程龙, 李正栋, 陈玉华, 等. 2013. 青海查涌地区铜多金属矿地质地球化学特征及找矿前景[J]. 黄金科学技术, 21(5): 34~39.
- 赵少卿, 付乐兵, 魏俊浩, 等. 2015. 青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 61~76.
- 郑宗学, 王旭春, 覃泽礼. 2012. 青海尕龙格玛铜多金属矿床地质特征及成矿模式研究[J]. 黄金科学技术, 20(1): 66~70.