

西藏列廷冈-勒青拉矽卡岩型 Fe-Cu-Pb-Zn 多金属矿床白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义

周梦林^{1,2}, 周向科³, 卢世银⁴, 马 旺²

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037;
3. 中国地质博物馆, 北京 100034; 4. 青海省地质调查院, 西宁 810012)

摘 要: 以列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 多金属矿床为研究对象, 通过对其 Fe 矿化阶段白云母的定年研究, 从成矿流体演化持续时间的角度对该问题进行了新的探索。系统的野外踏勘、显微镜下观察和电子探针工作表明, 列廷冈-勒青拉矿床中发育与磁铁矿共生的白云母。对白云母进行的 Ar-Ar 同位素测年工作表明, 白云母 Ar-Ar 坪年龄为 51.00 ± 0.38 Ma, 等时线年龄为 50.45 ± 0.62 Ma, 认为其代表了列廷冈-勒青拉矿床氧化物阶段铁矿化过程中开始结晶的白云母达到 Ar-Ar 体系封闭后的年龄。对比前人得出的辉钼矿年龄 (61.96 ± 0.58 Ma), 提出二者年龄的差异可能由于不同同位素体系在不同矿物中封闭温度的不同所致, 认为该矿床热液演化经历了较长时间, 演化过程导致的温度梯度的出现加剧了岩浆热液中带来的多金属物质(如 Pb、Zn、Cu、Fe)的分异, 为矿区多种金属矿物的共存提供了重要条件; 该矿床所属的冈底斯北成矿亚带相比较于其它两个成矿亚带具有更长的岩浆演化时间和区域矿化持续时间, 与其丰富的矿种组合发育相一致。

关键词: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄; 白云母; 列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 多金属矿床; 冈底斯; 西藏

中图分类号: P597+.3; P618.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)02-0241-18

Ar-Ar age of muscovite from the Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit in Tibet and its geological significance

ZHOU Meng-lin^{1,2}, ZHOU Xiang-ke³, LU Shi-yin⁴ and MA Wang²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Geological Museum of China, Beijing 100034, China; 4. Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, China)

Abstract: From north to south, there are three metallogenic belts in the Gangdise metallogenic region of the Tibetan Plateau, in which the northern metallogenic belt has a more abundant mineral composition (Fe-Cu-Pb-Zn-Mo) than the other two belts. The developmental mechanism of polymetallic coexistence has become the key of regional metallogenetic regularity research. In this paper, the authors studied the Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit. Based on the detailed study of muscovite in Fe ore-forming stage, the authors conducted a new exploration of this problem from the duration of ore-forming fluid evolution. The systematic field work, microscopic observation and electron microprobe analyses show that the magnetite-associated muscovite is developed in the Lietinggang-Leqingla deposit. Ar-Ar isotopic dating shows that the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age of muscovite

收稿日期: 2016-06-26; 接受日期: 2017-02-20

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(41403043, 41320104004, 41273050, 41302067, 41503040, 41302067); 中国地质调查局项目(DD20160024-02); 国际地质对比计划(IGCP/SIDA-600)

作者简介: 周梦林(1992-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要从事矿床学研究, E-mail: menglin@cugb.edu.cn。

is 51.00 ± 0.38 Ma and the isochron age is 50.45 ± 0.62 Ma. Systematic analysis suggests that this age represents the age of the muscovite crystallization during the oxide stage of the Lietinggang-Leqingla deposit after the closure of the Ar-Ar system. Compared with the molybdenite age (61.96 ± 0.58 Ma), the authors hold that the difference of ages may be attributed to the different closure temperatures of different isotopes in different minerals. It is believed that the hydrothermal evolution process lasted a long time. The occurrence of temperature gradients caused by this long hydrothermal evolution process might have aggravated the differentiation of polymetallic materials (such as Pb, Zn, Cu and Fe) in magmatic hydrothermal fluid, and provided an important condition for the coexistence of various metal minerals. From the perspective of the metallogenic belt, the Gangdise north mineralization belt had a longer magmatic evolution time and mineralization duration compared with the other belts, which is consistent with its rich mineral assemblage.

Key words: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age; muscovite; Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit; Gangdise; Tibet

Fund support: “Deep Resources Exploration and Exploitation” Key Special Project (2016YFC0600306); National Natural Science Foundation of China (41403043, 41320104004, 41273050, 41302067, 41503040, 41302067); Project of China Geological Survey (DD20160024-02); International Geological Correlation Program(IGCP/SIDA-600)

冈底斯成矿带是青藏高原碰撞造山带著名的多金属成矿带之一(侯增谦等, 2001; Hou and Cook, 2009),带内自北向南发育3个成矿亚带(图1a),其中南亚带以发育斑岩-矽卡岩型Cu-Mo-Au矿床为主(如努日Cu-Mo-W矿、程巴Mo-Cu矿、弄如日Au矿等)(刘云飞等, 2012; 王欣欣等, 2015; 尚振等, 2016),中亚带以发育斑岩型Cu-Mo矿床为主(如驱龙Cu矿、厅宫Cu-Mo矿等)(Yang *et al.*, 2005; 杨志明等, 2006; 杜等虎等, 2012),北亚带则较以上两个亚带的矿种更为丰富,以发育矽卡岩型Fe-Cu、Pb-Zn甚至Fe-Cu-Pb-Zn(-Mo)矿床为主(如纳如松多Pb-Zn矿、加多捕勒Fe-Cu矿、亚贵拉Pb-Zn-Mo矿、列廷冈Fe-Cu-Pb-Zn矿等)(杜欣等, 2010; 于玉帅等, 2011, 2014; 刘英超等, 2015; 马旺等, 2015)。鉴于冈底斯带巨大的成矿潜力,近年来,国内外地质工作者们完成了对带内多个矿床及带上区域成矿规律的多项研究(Meng *et al.*, 2003; 侯增谦等, 2006a; 2006b; 孟祥金等, 2007; Hou and Cook, 2009; Hou *et al.*, 2009; 侯增谦等, 2012; 唐菊兴等, 2014; Zheng *et al.*, 2015)。但是,为什么北亚带比其它成矿亚带具有更为丰富的矿种组成?整个北亚带区带上或者同一矿区内的Fe-Cu-Pb-Zn(-Mo)矿化(唐菊兴等, 2014; 付强等, 2015; 马旺等, 2015)是否具有演化关系?这些都是地质工作者们在进一步的科研工作和实际区域找矿工作中需要广泛关注和深入思考的问题。毕华等(1999)研究表明,随岩浆热液矿化持续进行,成矿金属组合会有显著差异。那么,北亚带上不同金属组合的矿床很有

可能与热液矿化持续时间和过程有关。因此,本文开展了该带内典型矿床的定年研究,从热液矿化持续时间角度,探讨该成矿带金属组合的差异原因。

列廷冈-勒青拉矽卡岩型Fe-Cu-Pb-Zn矿床发育在冈底斯北成矿亚带中部,是带内少有的几个同时发育Fe、Cu、Pb、Zn多种金属矿种的矿床之一。其成矿潜力较大,已探明Pb+Zn资源量($333+334$)55.31万吨(品位:Pb+Zn 7.74%),Fe资源量809万吨(品位:TFe 56.27%),伴生资源量Cu为3219.76吨,Ag为394.4吨(张林奎等, 2008),是整个北亚带Fe-Cu-Pb-Zn多金属矿化的典型代表。系统的矿床地质工作表明,列廷冈-勒青拉矿区内既发育了铁矿化阶段的白云母,又发育了Cu矿化阶段的辉钼矿(杨毅等, 2014),为矿区矿化作用时间的限定提供了有利条件。本文以Fe矿化阶段的白云母为主要研究对象,通过显微镜下观察、Ar-Ar同位素定年以及与已有辉钼矿Re-Os等时线年龄(杨毅等, 2014)的对比等工作,进一步探讨了其对Fe-Cu-Pb-Zn矿化共存的指示作用;同时,以此为立足点,对比了冈底斯成矿带区域矿化的演化时间,探讨了冈底斯北成矿亚带Fe-Cu-Pb-Zn多金属矿种共存的可能因素,以期对区域成矿规律的探索提供有益参考。

1 区域地质背景

列廷冈-勒青拉Fe-Cu-Pb-Zn多金属矿床位于冈底斯多金属成矿带北侧,该成矿带在地理位置上位于西藏自治区中部,其西起狮泉河、冈仁波齐,向东

经念青唐古拉山脉, 延伸至伯舒拉岭, 为一条近东西向展布的狭长块体, 范围与拉萨地块相当(图 1; 潘桂棠等, 2006); 在大地构造位置上, 其夹持于班公湖-怒江缝合带与雅鲁藏布江缝合带之间(侯增谦等, 2006a; 孟祥金等, 2007), 相当于青藏高原南部冈底斯-喜马拉雅构造区(潘桂棠等, 2006)。带内基底主体以前寒武纪变质岩系为主, 沉积盖层以中生代岩石为主, 包括砂岩、板岩、灰岩和泥岩等, 此外也包括少量古生代石炭-二叠纪沉积岩中的陆缘弧火山岩和滨海杂砂岩(潘桂棠等, 2004; Zheng *et al.*, 2015)。区内发育由新生代初印度板块和欧亚板块碰撞导致的大规模造山作用伴生的线性复式褶皱和压扭性逆冲推覆构造(图 1b; 侯增谦等, 2006a; 孟祥金等, 2007; 付强等, 2013), 主要以近 EW 向为主、倾向 N 或 NNE 的逆冲断层和推覆体组成, 并在东

部发育 NE 向旁多-羊八井裂谷(孟祥金等, 2007; Blisniuk *et al.*, 2001)。

纵观整个冈底斯成矿带, 其新生代岩浆作用主要可分为以下几个阶段: 第 1 阶段为印度板块和欧亚板块发生碰撞的主碰撞时期, 该阶段时间主要为 65~41 Ma, 主要形成了覆盖在白垩纪地层之上以钙碱性-高钾钙碱性-钾玄岩系列岩石组合为特征的林子宗火山岩系以及闪长岩-二长闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩组合为特征的冈底斯花岗岩基(Harris *et al.*, 1990; Lee and Lawver, 1995; Mo *et al.*, 2005; 侯增谦等, 2006a); 第 2 阶段为印度板块和欧亚板块发生碰撞的晚碰撞时期, 该阶段时间为 40~26 Ma, 在冈底斯南部形成了少量高铝花岗岩(侯增谦等, 2006d; Hou *et al.*, 2006); 第 3 阶段为印度板块和欧亚板块发生碰撞的后碰撞伸展期, 发育在

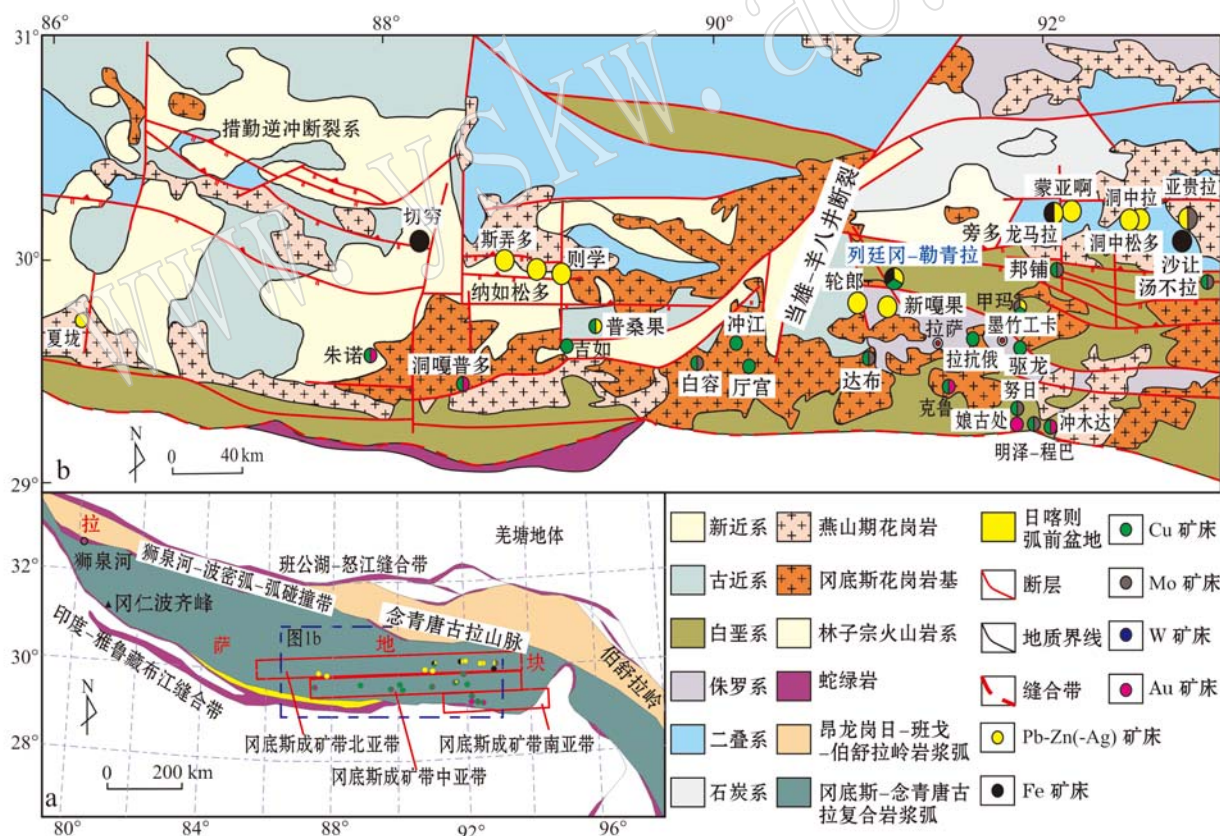


图 1 冈底斯带构造分区(a, 据潘桂棠等, 2006 修改)和冈底斯北成矿亚带与岩浆作用相关的成矿作用地质背景简图(b, 据侯增谦等, 2006c; 孟祥金等, 2007 修改)

Fig. 1 Tectonic subdivisions for the Gangdise region (a, modified after Pan Guitang *et al.*, 2006) and geological setting of the northern Gangdese metallogenetic belt for the igneous rock related metallogenesis (b, modified after Hou Zengqian *et al.*, 2006c; Meng Xiangjin *et al.*, 2007)

25 Ma 以新,主要形成了沿冈底斯中带分布的呈斑岩产出的钾质-超钾质岩浆岩和冈底斯南带的高铝-过铝花岗岩(Zheng *et al.*, 2015)。这些岩浆岩在区带上广泛分布并具多期次特征,为区域成矿作用提供了丰富的热源和成矿物质,成为冈底斯带成矿的重要因素之一(Miller *et al.*, 1999; Ding *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2004; 侯增谦等, 2006d; 范文玉等, 2007)。列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 多金属矿床位于冈底斯北成矿亚带内,同矿区内大面积出露的 65~41 Ma 的花岗岩类侵入体关系密切(马旺等, 2015)。

2 矿床地质特征

列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 多金属矿床位于西藏自治区林周县与堆龙德庆县交界处,矿区出露地层从底到顶包括:中二叠统洛巴堆组(P_2l)凝灰质砂岩、厚层灰岩、安山质玄武岩,上二叠统蒙拉组(P_3m)凝灰质砂岩、灰岩夹板岩、钙质泥岩夹粉砂岩,上三叠统甲拉浦组(T_{3j})砂岩、粉砂岩、泥岩,以及始新统年波组(E_{2n})火山碎屑岩和第四系(Q)冲洪积物(图2)。其中中二叠统洛巴堆组(P_2l)地层主要在矿区南部出露,上二叠统蒙拉组(P_3m)在矿区南北两侧出露,上三叠统甲拉浦组(T_{3j})在矿区中部出露,始新统年波组(E_{2n})则仅在矿区西北角出露。

矿区构造以开阔的褶皱、逆冲或走滑性质的断层为主。该地区的褶皱为近南北向挤压形成的勒青拉复式向斜和帮舍扎日南复式背斜。向斜核部发育花岗岩侵入体,大面积的甲拉浦组和蒙拉组上部地层缺失。背斜则发育多个次级褶皱,这些次级褶皱使地层的走向和倾向呈波状起伏,在背斜的轴部、转折端和两翼均发育有层间滑脱和一系列东西向的断裂构造,它们所形成的虚脱空间为矿床形成提供了热液运移通道和成矿空间。该地区的断裂构造可分为4组:第1组为近东西向逆冲断层,多数为由北向南逆冲,倾角 $45^\circ \sim 70^\circ$,具有斜列等间距分布的特征,规模较大,为主要的控矿构造;第2组为近南北向的走滑断层,具有右旋走滑剪切性质,与成矿关系并不密切;第3组和第4组为共轭剪切断层,具有走滑断层特征,在区域上有一定的控矿作用,但与矿化关系并不密切。后3组均表现出规模小、形成晚的特点,主要起对第1组断层改造破坏的作用(李建忠等, 2004; 张林奎等, 2008)。

矿区内中酸性侵入岩广泛发育,主要出露两类,

一类为闪长玢岩,以岩株形式散布在矿区中西部;另一类为花岗岩类,包括花岗斑岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等多种,呈岩基发育在矿区东南部,并在局部侵入到矿区地层中(图2),称为居布扎日岩体(62.85 ± 0.58 Ma, 马旺等, 2015),与成矿作用密切相关(范文玉等, 2007; 张林奎等, 2012; 马旺等, 2015)。围绕居布扎日岩体,矽卡岩化和 Fe-Cu-Pb-Zn 矿化出现规律性变化。在岩体南北两侧与灰岩接触带上接触变质强烈,灰岩发生强大理岩化、石榴子石矽卡岩化,发育石榴子石、透辉石-次透辉石、阳起石、绿帘石、绿泥石等矽卡岩矿物,并伴随发育磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿为主的矿石矿物和以石英、方解石、萤石为主的脉石矿物,形成 Fe-Cu(-Mo)矿体(图2);而远离岩体的灰岩夹板岩地层内则矽卡岩化较弱,发生钙铁辉石-铁阳起石矽卡岩化,发育钙铁辉石、铁阳起石、绿帘石、绿泥石等矽卡岩矿物,伴随发育以方铅矿、闪锌矿、黄铜矿为主的矿石矿物和以石英、方解石为主的脉石矿物,形成 Pb-Zn(-Cu)矿体(图2)。其中,近岩体部位的 Fe-Cu-Mo 矿体呈囊状或透镜状,发育在岩体和大理岩之间的石榴子石矽卡岩内(图3a),远离岩体的 Pb-Zn-Cu 矿体则呈层状发育在板岩和灰岩地层之间,同阳起石矽卡岩发育位置一致(图3b)。两套矿化虽矿物组合出现差异,但矿石构造相似,主要为浸染状、块状和斑团状构造(图4)。

根据系统的矿区地质填图工作和详细的样品探针片镜下鉴定工作,矿区的热液蚀变及成矿期次可划分为5个阶段,包括早矽卡岩阶段、晚矽卡岩阶段、氧化物阶段、石英硫化物阶段和碳酸盐阶段(据马旺未刊资料;图5)。其中,早矽卡岩阶段主要发育石榴子石、透辉石等干矽卡岩矿物;晚矽卡岩阶段主要发育阳起石、透闪石等湿矽卡岩矿物,白云母在该阶段开始出现;氧化物阶段主要发育角闪石、磁铁矿、石英等矿物,并为白云母发育的主要阶段;石英硫化物阶段主要发育黄铁矿、雌黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等矿石矿物以及石英、方解石等脉石矿物;碳酸盐阶段主要发育石英、方解石以及少量的方铅矿。

3 样品采集及测试方法

3.1 样品采集

用于分析测试的白云母取自列廷冈矿段近 Fe-Cu 矿体处的绿泥石化、绿帘石化花岗岩中($30^\circ 3' 33''N$,

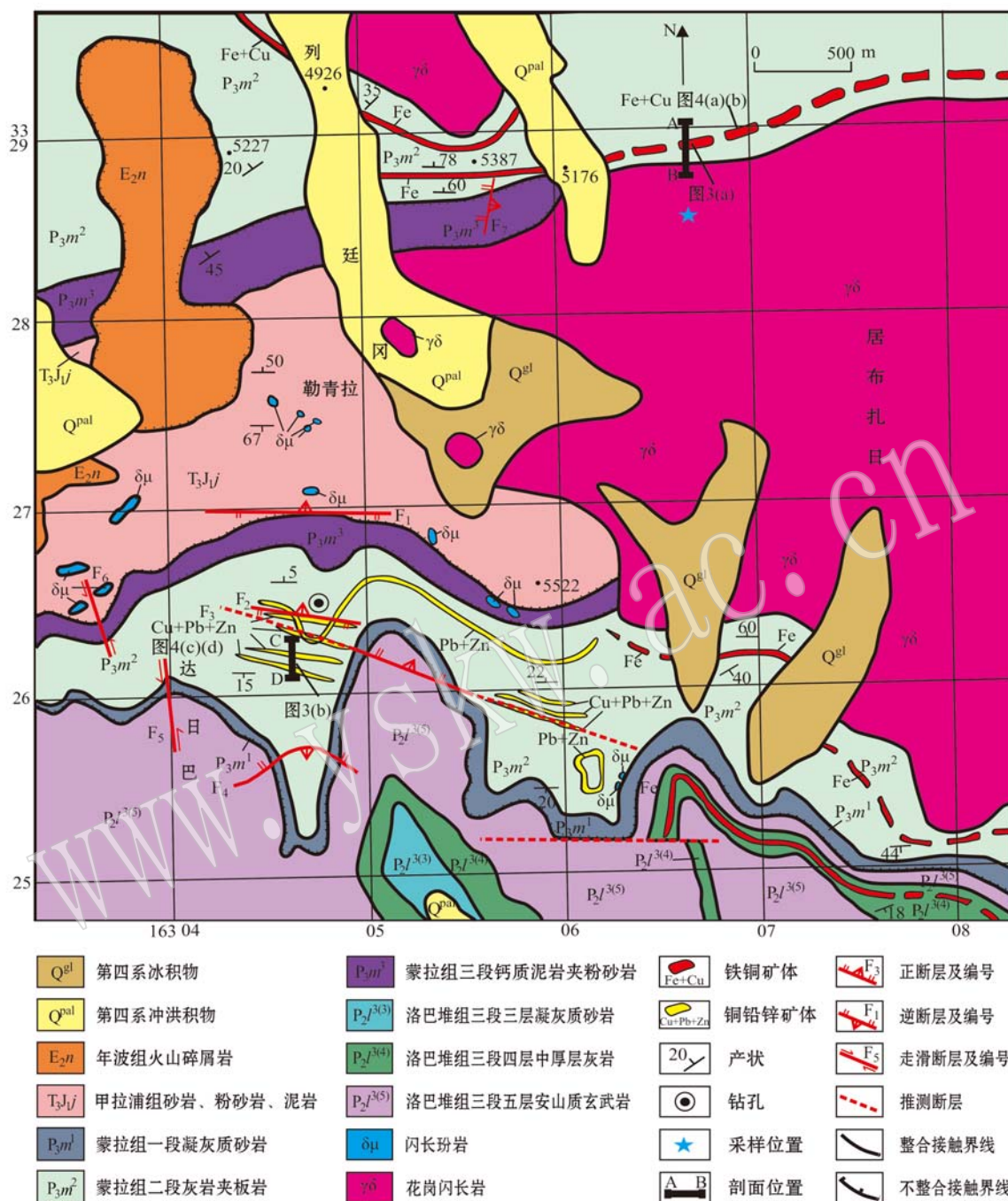


图 2 列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 矿区地质简图(据范文玉等,2007 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit (modified after Fan Wenyu *et al.*, 2007)

90°59′32.4″E), 白云母-磁铁矿呈共生脉状(图 6a、6b), 并在后期充填了石英、方解石等(图 6e、6f)。手标本上白云母呈灰白色细小片状, 镜下呈自形放射状结构, 有一组极完全节理, 干涉色为二级黄-二级蓝绿, 与磁铁矿呈密切共生关系(图 6c、6d)。

镜下观察发现, 白云母磁铁矿脉内还有大量石

英和少量方解石的发育, 就石英的自形程度(图 6e、6f, 图 6f 中因探针片厚度偏厚, 导致石英干涉色存在一定偏差)、石英同白云母的相互关系(白云母仅生长在自形石英的根部位置以及部分石英以白云母为起点生长)、方解石明显充填晶洞的产状, 推测白云母开始结晶的时间节点早于或近于石英, 方解石的

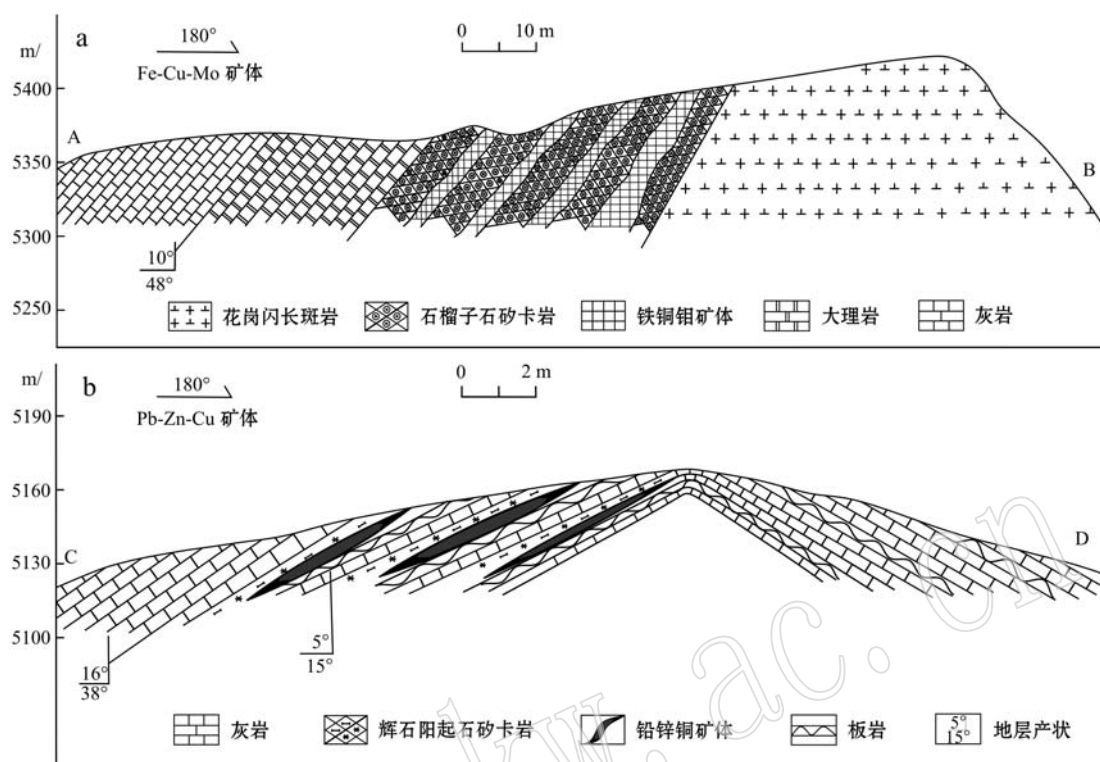


图 3 列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 矿床矿体形态素描图(剖面位置见图 2)

Fig. 3 Geological section map of orebody in the Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit

(See the location of the sections in Fig. 2)

结晶时间节点晚于石英。这一矿物共生组合次序表明,本次工作测定的白云母至少在氧化物阶段 Fe 矿化时期已经开始结晶,并可能持续到硫化物阶段早期,随后随着温度的降低,石英硫化物阶段的石英、碳酸盐阶段的方解石在原有热液活动的基础上沉淀。

3.2 测试方法

3.2.1 电子探针实验

为了判断本次测年工作所分析云母样品的具体性质,将样品(LTG13-2-29-3)磨制成探针片,利用中国地质科学院矿产资源研究所的 JEOL-JXA8230 型电子探针对其进行了成分分析。实验过程中氧化物加速电压为 15 kV,硫化物为 20 kV,束斑直径为 5 μm ,标样采用天然矿物或国家标准合成金属,分析误差小于 0.01%。

3.2.2 白云母 Ar-Ar 定年实验

白云母被挑选至纯度 >99% 之后用超声波、经过亚沸腾蒸馏净化的蒸馏水、丙酮分别清洗,然后封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作在中国原子能科学研究院的“游泳池堆”中进行,使

用 B4 孔道,中子流密度约为 $2.65 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,照射总时间为 1 441 min,积分中子通量为 $2.29 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 。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%。

样品的阶段升温加热使用石墨炉,每一个阶段加热 30 min,净化 30 min。质谱分析在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行,每个峰值均采集 20 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 获得,其值为 $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.0002389$ 、 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$ 、 $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$ 。数据通过 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线,坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程请参见相关文献(陈文等,2006)。

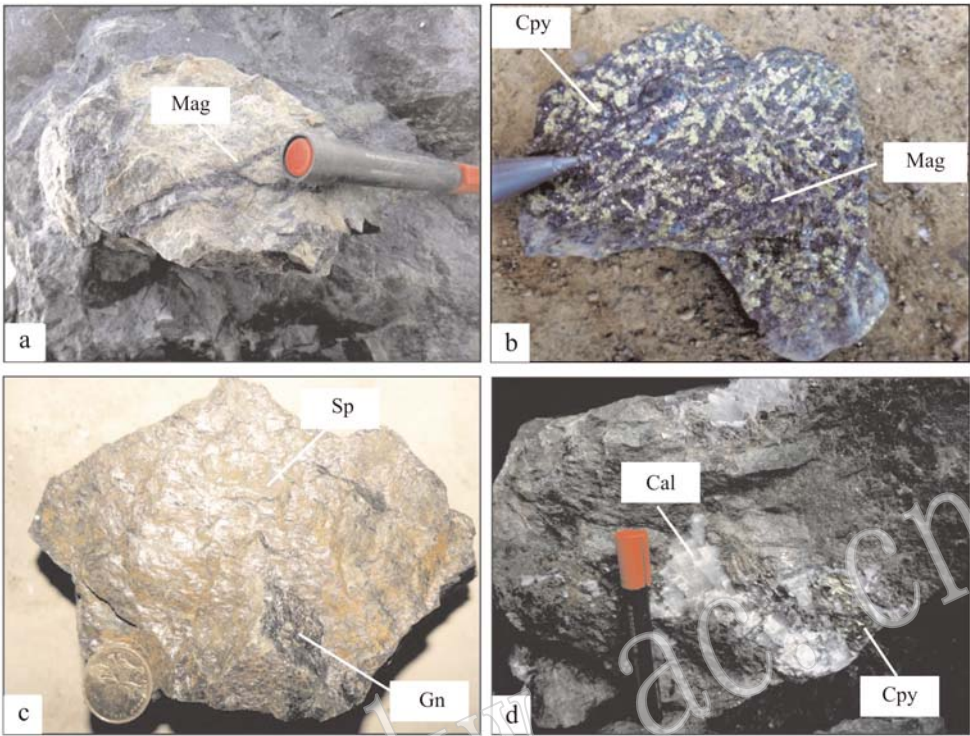


图 4 列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 矿床矿石结构构造(采样位置见图 2)
Fig. 4 Structure characteristics of ores from the Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit
(See the location of the samples in Fig. 2)

a—Fe-Cu-Mo 矿体磁铁矿矿石；b—Fe-Cu-Mo 矿体磁铁矿黄铜矿矿石；c—Pb-Zn-Cu 矿体闪锌矿方铅矿矿石；d—Pb-Zn-Cu 矿体黄铜矿矿石；
Sp—闪锌矿；Cpy—黄铜矿；Gn—方铅矿；Mag—磁铁矿；Cal—方解石
a—magnetite ore from Fe-Cu-Mo orebody；b—magnetite and chalcopyrite ore from Fe-Cu-Mo orebody；c—sphalerite and galena ore from Pb-Zn-Cu orebody；d—chalcopyrite ore from Pb-Zn-Cu orebody；Sp—sphalerite；Cpy—chalcopyrite；Gn—galena；
Mag—magnetite；Cal—calcite

期次 矿物	早矽卡岩阶段	晚矽卡岩阶段	氧化物阶段	石英硫化物阶段	碳酸盐阶段
石榴子石	●				
透辉石	●				
硅灰石	●				
阳起石		●			
透闪石		●			
绿泥石		●	●	●	
绿帘石		●	●	●	
角闪石			●		
绢云母			●	●	
白云母			●	●	
磁铁矿			●		
石英			●	●	●
萤石				●	
黄铁矿				●	
磁黄铁矿				●	
辉钼矿				●	
黄铜矿				●	
方解石				●	●
闪锌矿				●	
方铅矿				●	●

图 5 列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 矿区矿物共生组合次序
Fig. 5 Paragenetic assemblage and sequence of hydrothermal minerals in the Lietinggang-Leqingla deposit

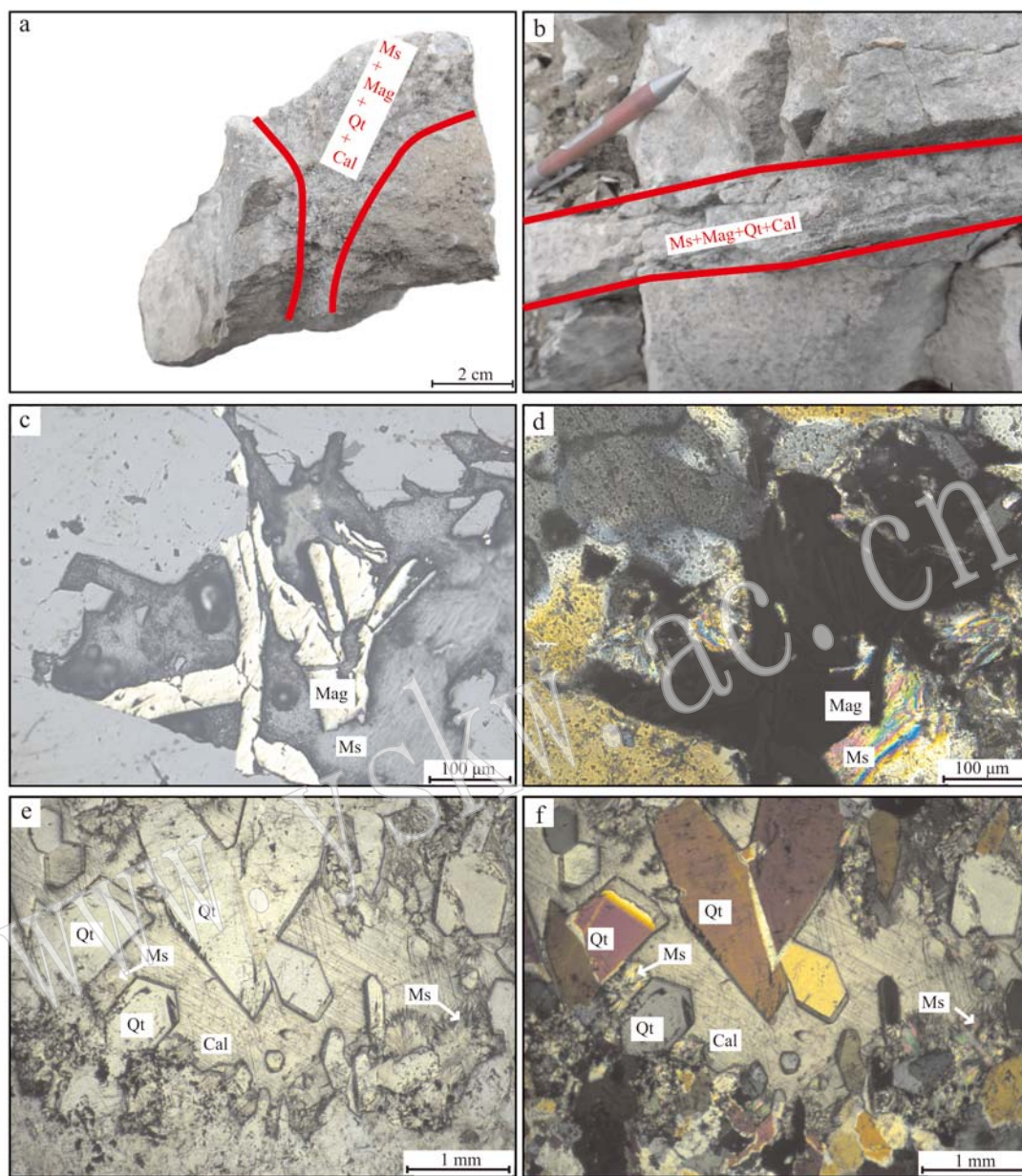


图 6 列廷冈-勒青拉矿床白云母-磁铁矿-石英-方解石脉样品特征

Fig. 6 Sample characteristics of muscovite-magnetite-quartz-calcite vein from the Lietinggang-Leqingla deposit

a, b—花岗岩中的白云母-磁铁矿-石英-方解石脉；c—反射光下与白云母共生的磁铁矿；d—正交偏光下与白云母共生的磁铁矿；e—单偏光下被方解石充填的石英晶洞；f—正交偏光下被方解石充填的石英晶洞(探针片厚度偏厚, 导致石英干涉色存在一定偏差)；Qt—石英；Cal—方解石；Ms—白云母；Mag—磁铁矿

a, b—muscovite-magnetite-quartz-calcite calcite vein from granite; c—magnetite associated with muscovite (reflected light); d—magnetite associated with muscovite(crossed nicols); e—quartz geode filled with calcite (plainlight); f—quartz geode filled with calcite (crossed nicols) (the relatively great thickness causes unusual interference color); Qt—quartz; Cal—calcite; Ms—muscovite; Mag—magnetite

4 测试结果

4.1 电子探针实验结果

电子探针实验分析结果表明本次测年分析所用

白云母 SiO_2 含量在 45.045% ~ 48.259% 之间, Al_2O_3 含量在 29.251% ~ 32.352% 之间, 而 FeO 的含量在 3.350% ~ 6.743% 之间, MgO 含量基本可以忽略(表 1), 计算获得其分子式接近 $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$, 属白云母。

表 1 列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 矿区白云母电子探针分析结果 ω_B/%

Table 1 Electron microprobe analyses of muscovite from the Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit												
样品号	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MnO	TiO ₂	NiO	Cr ₂ O ₃	Total
LTG13-29-3-q3-2	45.574	0.095	31.149	5.722	0.099	9.815	0.078	0.003	0.081	0.061	0	92.865
LTG13-29-3-q3-3	46.916	0.110	29.251	6.743	0.213	9.309	0.063	0	0	0	0.030	92.885
LTG13-29-3-q5-2	45.936	0.047	32.352	3.350	0.271	9.192	0.013	0.024	0.153	0.027	0.031	91.951
LTG13-29-3-q6-2	45.045	0.676	29.612	4.691	0.152	9.367	0.030	0.003	0	0	0.009	90.067
LTG13-29-3-q6-3	48.259	0.451	29.255	4.744	0.218	8.812	0.070	0.010	0	0	0.023	92.604

4.2 白云母 Ar-Ar 定年实验结果

在 700~1 400℃ 温度范围内,对经过照射的白云母进行了 12 个阶段的释热分析(表 2),白云母总气体年龄为 51.00 Ma,在中高温释热阶段(760~1 400℃)构成的坪年龄为 51.00±0.38 Ma(图 7a),对应 96.8% 的 ³⁹Ar 释放量,相应的 ³⁹Ar/³⁶Ar-⁴⁰Ar/³⁶Ar 等时线年龄为 50.45±0.62 Ma(MSWD=4.5)(图 7b)。从分析结果可以看出该样品的总气体

年龄、坪年龄相应的等时线年龄在误差范围内一致,⁴⁰Ar/³⁹Ar 初始值在误差范围内和现在大气氩比值(295.5)接近,表明白云母形成时没有捕获过剩氩,因此,样品的坪年龄可以代表矿物的结晶年龄。由白云母与磁铁矿的共生关系可知,白云母的结晶年龄代表了列廷冈-勒青拉矿床 Fe 矿化过程中氧化物阶段结晶的白云母的封闭年龄(51.00±0.38 Ma)。

表 2 列廷冈-勒青拉矿区白云母样品⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温测年数据
Table 2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar analytical data of muscovite samples from the Lietinggang-Leqingla deposit

t/℃	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar/%	F	³⁹ Ar/ 10 ⁻¹⁴ mol)	累积 ³⁹ Ar/%	年龄/Ma	±1σ/Ma
700	14.345 9	0.016 1	0	0.019 2	66.76	9.577 6	0.07	3.20	44.10	0.57
760	12.720 9	0.004 8	0.108	0.015 6	88.78	11.294 6	1.81	11.45	51.90	0.54
800	11.537 9	0.001 0	0	0.013 0	97.28	11.223 9	2.36	22.21	51.58	0.53
840	11.341 2	0.001 1	0	0.013 1	97.14	11.016 5	3.40	37.78	50.64	0.52
880	11.25	0.000 8	0	0.013 2	97.76	10.998 6	4.36	57.70	50.56	0.51
910	11.262 3	0.000 9	0	0.013 3	97.55	10.986 7	3.26	72.61	50.50	0.51
940	11.317 3	0.001 0	0	0.013 6	97.33	11.014 6	2.92	85.94	50.63	0.51
970	11.550 1	0.001 1	0	0.013 2	97.09	11.213 5	1.78	94.09	51.53	0.54
1 000	11.368 4	0.001 2	0	0.012 6	96.77	11.001 6	0.07	97.50	50.57	0.93
1 050	13.152 3	0.006 5	0	0.011 6	85.40	11.232 0	0.03	98.78	51.60	1.30
1 150	14.701 2	0.013 2	0	0.035 1	73.42	10.794 3	0.02	99.47	49.60	4.70
1 400	21.192 4	0.038 4	0	0.017 8	46.40	9.833 6	0.01	100	45.30	3.60

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值;W=31.25 mg;J=0.002 584;F=⁴⁰Ar*/³⁹Ar。

5 讨论

5.1 列廷冈-勒青拉矿区白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄意义

手标本及显微镜下观察发现,本次测试所用的白云母与磁铁矿密切共生(图 6c、6d),其结晶于氧化物阶段的 Fe 矿化时期(图 6e、6f)。研究表明,应用⁴⁰Ar/³⁹Ar 法测定白云母年龄时的封闭温度为 350~400℃(Suzuki *et al.*, 1996; Julien *et al.*, 2009; 陈文等, 2011),也即热液体系达到这一温度时,白云

母的化学体系封闭,不再和液相热液体系发生 Ar 同位素的交换,其 Ar 同位素体系趋于稳定(Dodson, 1973)。根据这一认识,判断本次测定的白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄应为热液体系降温至该封闭温度时的年龄。按照最保守估计,可认为是热液体系降至 350℃ 时的年龄。显微测温工作表明,在早矽卡岩阶段,其热液温度约为 600~400℃,晚矽卡岩到氧化物阶段热液温度不详,但到石英硫化物阶段热液温度至少降至 420~220℃,整体呈温度下降趋势演化(马旺未发表资料)。因此,本次获得的白云母年龄或许不能准确代表与之共生的磁铁矿矿化时期的年龄(该

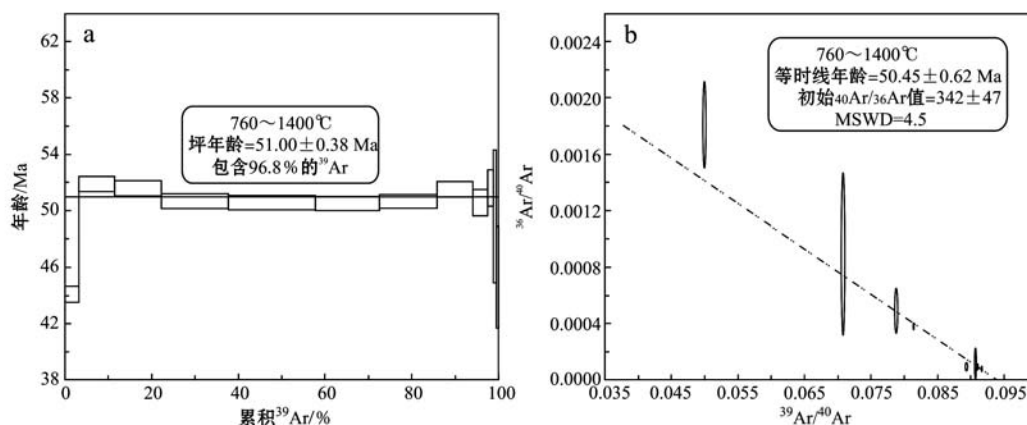


图 7 列廷冈-勒青拉矿区白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(a)和正等时线年龄(b)

Fig. 7 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age (a) and isochron age (b) of muscovite from the Lietinggang-Leqingla deposit

阶段白云母可能尚未封闭,但至少代表了成矿热液体系演化至 $\sim 350^\circ\text{C}$ 的年龄。

前人研究提出,列廷冈-勒青拉矿区在石英硫化物阶段有辉钼矿存在,其 Re-Os 同位素等时线年龄为 $61.96 \pm 0.58 \text{ Ma}$ (杨毅等, 2014), 这一年龄同本次获得的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄相差近 10 Ma。这种在同一矿床应用不同矿物的不同同位素体系获得不同年龄的现象多有存在, 如同在冈底斯带的蒙亚啊 Pb-Zn-Cu-Fe 矿床, 其辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 63 Ma (唐菊兴等, 2014), 白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 54.6 Ma (付强等, 2015), 也出现将近 9 Ma 的时差。对于这种现象可有多种解释, 如: ① 白云母是在后期热液活动中形成的 (比如在新一期岩浆作用导致的矽卡岩化过程中产出) (唐菊兴等, 2009b); ② 矿体形成后发育后期的热事件, 且热事件温度超过了白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的封闭温度, 扰乱了白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 体系, 使白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 体系中放射性元素成分发生了改变, 从而测定的坪年龄也会发生改变。以上所假定的后期热事件温度均要求未达到辉钼矿 Re-Os 的封闭温度, 也即辉钼矿 Re-Os 体系仍保持稳定, 这时则会产生相应的年龄差 (Suzuki *et al.*, 1996)。实际上, 在多项研究工作中, 以上两种解释都是较为常见的对同一矿区不同年龄数据出现时的解释方式 (唐菊兴等, 2009b; 付强等, 2015)。当然, 这些解释还必须伴随着其它相关证据, 比如说矿区有较新年龄的岩浆作用存在, 两个年龄所代表不同阶段的相关矿物组合存在对应的穿插关系等 (唐菊兴等, 2009b)。但是, 如果从热液体系的温度演化来考虑的话, 以上年龄差或许还有另一种解释

的存在。如前所述, 同位素等时线测年获得的年龄代表的是矿物在相应同位素体系封闭时的年龄, 即辉钼矿 Re-Os 法测定的是热液体系在 $\sim 500^\circ\text{C}$ 时该体系在辉钼矿中达到封闭时的年龄 (Suzuki *et al.*, 1996), 白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定的年龄是热液体系在 350°C 时该体系在云母中达到封闭时的年龄 (陈文等, 2011), 二者之间存在约 150°C 的温度差, 也就是说, 这个年龄差异也有可能是由于热液体系缓慢降温或者间隔降温所导致的 (Suzuki *et al.*, 1996)。对于此次获得的白云母 Ar-Ar 年龄与先前报道的辉钼矿的 Re-Os 年龄的差异, 作者并不排斥应用后期存在一期热液活动来解释。但是, 经过进一步对列廷冈-勒青拉矿区岩浆期次的厘定和对各阶段矿物组合之间穿插关系的观察, 并未发现 $\sim 50 \text{ Ma}$ 左右岩浆事件的存在 (付强等, 未刊资料), 也未见矽卡岩矿物之间对应的穿插关系, 所以, 作者尝试用第 3 种热液体系演化来探讨这一现象, 以下认识仅做讨论用, 以提供一个新的思路: 推测列廷冈-勒青拉矿床中辉钼矿 Re-Os 等时线测年和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年所获得的年龄时间差是由于两种矿物的不同同位素封闭温度所导致的, 与矿化密切相关的居布扎日复式岩体 ($62.85 \pm 0.58 \text{ Ma}$, 马旺等, 2015) 规模巨大 (图 2), 其侵位过程中导致的热液演化可能是一个漫长的温度演化过程, 从而导致这一年龄差的存在。这一认识同张科 (2006) 认为的列廷冈成矿时间较长的结论相似。

如此漫长的温度演化过程反映了矿区岩浆活动的持续性和复杂性, 也反映了成矿热液同地层的大范围水岩交换作用的进行。而进一步的这种热液演

化模式导致的温度梯度的出现会加剧岩浆热液中所带来的多金属物质(如 Pb、Zn、Cu、Fe)的分异。例如,在近岩体位置,热液体系温度相对较高,携带金属物质中 Fe、Cu 含量较高,偏氧化性质,形成以磁铁矿为主的 Fe-Cu 矿体;而在远岩体位置,热液体系温度下降,携带的金属物质多以 Pb、Zn 为主,且同地层发生了大范围的水岩交换作用的同时获取了地层中的大量还原硫(费凡等, 2015),形成以方铅矿、闪锌矿为主的 Pb-Zn-Cu 矿体。这种 Fe-Cu-Pb-Zn 共生的矿化现象同岩浆源区的关系非常密切,但是这种漫长的温度演化过程也必定在其中发挥了重要作用。

5.2 区域矿化持续时间的意义

如前所述,冈底斯成矿带内自北向南发育 3 个成矿亚带(图 1),每个成矿亚带内有不同的金属矿化组合,但其均与岩浆作用相关(表 3)。根据上述新思

路讨论所获得的认识,本次工作尝试从矿化持续时间的角度对 3 个成矿亚带进行了对比。以下认识仅做讨论,是对区域成矿作用的一个思考。如图 8 所示,冈底斯北成矿亚带整个矿带的岩浆作用发生在 66~50 Ma,持续时间达 16 Ma,主要的成矿岩体以花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、二长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩为主,其形成了一系列矽卡岩型 Fe-Cu-Pb-Zn 矿床,带内发生矿化时间为 67~50 Ma,其持续时间 17 Ma;冈底斯中成矿亚带整个矿带的岩浆作用发生在 19~13 Ma,持续时间 6 Ma,主要的成矿岩体以二长花岗斑岩、花岗斑岩、黑云母花岗闪长岩、花岗闪长岩为主,形成了一系列斑岩型 Cu-Mo 矿床,其矿化时间发生在 20~13 Ma,其持续时间约 7 Ma;南成矿亚带整个矿带的岩浆作用发生在 30~24 Ma,持续时间 6 Ma,主要的成矿岩体为二长花岗

表 3 冈底斯成矿带矿床成矿年龄及成岩年龄

Table 3 Mineralization age and diagenetic age of deposits from the Gangdese metallogenic belt

成矿带	矿床名称	矿床类型	成矿年龄及测试方法	成矿岩体及成岩年龄	资料来源
北 亚 带	加多捕勒	矽卡岩型 Fe-Cu	50 Ma (U-Pb)	黑云母二长花岗岩 (50.9 Ma)	于玉帅等 (2011, 2014)
	沙让	斑岩型 Mo	55 Ma (Re-Os)	闪长岩 (53 Ma)	唐菊兴等 (2009a); 高一鸣等(2010)
	龙马拉	矽卡岩型 Cu-Fe-Pb-Zn	56 Ma (Ar-Ar)	黑云母二长花岗岩 (56 Ma)	付强等(2014); 林鑫(2015)
	纳如松多	隐爆角砾岩-矽卡岩型 Pb-Zn	57 Ma (Ar-Ar)	石英正长斑岩 (62 Ma)	纪现华等(2012, 2014)
	列廷冈	矽卡岩型 Pb-Zn-Fe-Cu-Mo	61 Ma (Re-Os) 51 Ma (Ar-Ar)	花岗闪长斑岩 (62 Ma)	杨毅等(2014); 本文
	哈海岗	矽卡岩型 W-Mo-Pb-Zn-Cu	63 Ma (Re-Os)	黑云母二长花岗岩	Zheng 等(2015); 王立强等 (2012)
	蒙亚啊	矽卡岩型 Pb-Zn-Cu-Fe	63 Ma (Re-Os) 53 Ma (Ar-Ar)	花岗斑岩	唐菊兴等(2014); 付强等(2015)
	加拉普	矽卡岩型 Fe-Cu	63 Ma (U-Pb)	花岗闪长岩 (63 Ma)	付强等(2013)
	亚贵拉	矽卡岩型 Pb-Zn-Mo	65 Ma (Re-Os)	石英斑岩 (62 Ma)	高一鸣等(2011); 黄克贤等(2012)
	恰功	矽卡岩型 Pb-Zn-Fe	67 Ma (U-Pb)	石英斑岩 (66 Ma)	李应栩等(2011)
中 亚 带	朱诺	斑岩型 Cu-Au	13 Ma (Re-Os)	黑云母花岗闪长岩 (13 Ma)	郑有业等(2007)
	拉抗俄	斑岩型 Cu-Mo	13 Ma (Re-Os)	花岗闪长斑岩	侯增谦等(2003); 冷秋峰等(2015)
	冲江	斑岩型 Cu-Au	14 Ma (Re-Os)	二长花岗斑岩 (15 Ma)	侯增谦等(2003); 林武等(2004)
	南木	斑岩型 Cu-Mo	14 Ma (Re-Os)	二长花岗斑岩 (16 Ma)	侯增谦等(2003)
	达布	斑岩型 Cu-Mo	14 Ma (Re-Os)	花岗闪长斑岩 (16 Ma)	高一鸣等(2012)
	驱龙	斑岩型 Cu-Mo	15~16 Ma (Re-Os)	黑云母花岗闪长岩 (16 Ma)	王亮亮等(2006)
	邦铺	斑岩型 Mo-Cu	15 Ma (Re-Os)	二长花岗斑岩 (16 Ma)	王立强等(2011)
	厅宫	斑岩型 Cu-Mo	15 Ma (Re-Os)	斑状二长花岗岩 (17 Ma)	芮宗瑶等(2004)
	甲玛	斑岩型 Cu-Mo	15 Ma (Re-Os)	花岗斑岩 (15~16 Ma)	秦志鹏等(2011); 应丽娟等(2010)
	汤不拉	斑岩型 Mo-Cu	20 Ma (Re-Os)	花岗斑岩 (19 Ma)	王保弟等(2010)
南 亚 带	努日	斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-W	23 Ma (Re-Os)	闪长斑岩 (24 Ma)	侯增谦等(2012)
	程巴	斑岩-矽卡岩型 Mo-Cu	30 Ma (Re-Os)	花岗闪长岩 (29.4 Ma)	尚振等(2016); 孙祥等(2013)
	明泽	斑岩型 Mo	30 Ma (Re-Os)	二长岩 (30 Ma)	孙祥等(2013); 闫学义等(2010)
	帕南	斑岩型 Mo	32 Ma (Re-Os)	二长花岗斑岩	段连峰等(2014)

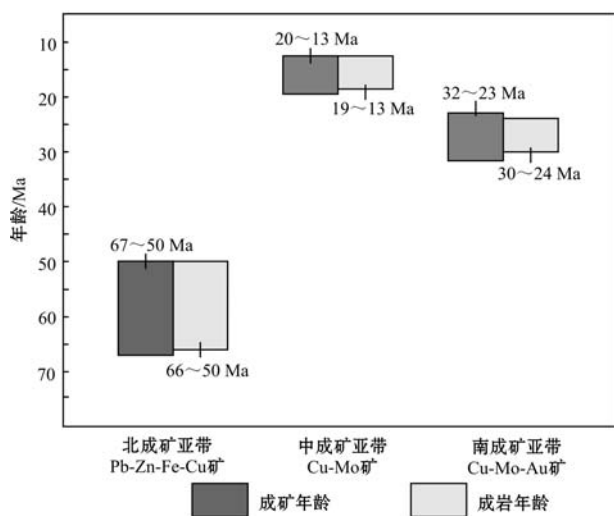


图8 冈底斯成矿带矿床成矿及成岩持续时间对比

Fig. 8 The mineralization and diagenetic duration of deposits from the Gangdise metallogenic belt

部分矿床成岩年龄的欠缺导致相同成矿带上出现成岩时间晚于成矿时间的错觉

The missing ages for ore-related magmatism in some deposits made the illusion that the magmatic rocks formed later than the mineralization in the same metallogenic sub-belt

斑岩、二长岩、花岗闪长岩和闪长玢岩,形成了一系列斑岩型-矽卡岩型 Cu-Mo-Au 矿床,其矿化时间发生在 32~23 Ma,其持续时间约 9 Ma。通过对比可以发现,北成矿亚带岩浆活动时间、热液体系的矿化时间都明显长于其它两个成矿亚带,而相对应的,北成矿亚带内矿种类型也明显多于其它两个成矿亚带。这种现象的存在,固然同带来金属物质的成矿岩体的壳幔来源不同有关(Hou *et al.*, 2013, 2015),但也对矿种多样性的产生提供了一个新视角,即:区带上岩浆作用演化时间越长,所经历的演化阶段越多,其分异越大(毕华等,1999),随岩浆流体带来的成矿物质种类也有可能越为丰富,而对应的成矿流体演化持续时间也会越长,热液运移距离、与地层的水岩交换作用等也会随之增强,从而形成具有更大成矿潜力、更多矿种组合共存的矿床。例如,中成矿亚带和南成矿亚带的岩浆演化都极为集中,区带上的热液演化时间也很短,这种情况下,矿床多形成分布集中的斑岩型 Cu-Mo-W 等矿床,其成矿热液很难进行远距离的迁移,斑岩型矿体外围也多难以形成其它类型及矿种的矿化。但是,北成矿亚带的岩浆演化时间明显增长,其岩浆作用持续时间达 16 Ma,矿化持续时间为 17 Ma,所以不管是在

区带上,还是在单个矿床内,都形成了范围较大的 Pb、Zn、Fe、Cu、甚至 Mo 的多矿种矿化的共生组合。

6 结论

(1) 列廷冈-勒青拉矿区为发育在冈底斯北成矿亚带内最典型的 Fe-Cu-Pb-Zn 矿种共生的矽卡岩型矿床,其中发育的与磁铁矿共生的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果为 51.00 ± 0.38 Ma,代表了氧化物阶段 Fe 矿化过程中开始结晶的白云母 Ar-Ar 体系封闭时的年龄。

(2) 已报道辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄与本次白云母 Ar-Ar 同位素年龄存在一定差异,推测该差异是由于两种矿物对各自定年测试时所用同位素的封闭温度的差异导致的,列廷冈-勒青拉矿区的热液体系经历了较长的缓慢降温过程,这种漫长的温度演化过程为矿区中多种金属矿物的共生和分异提供了重要条件。

(3) 冈底斯成矿带自北向南 3 个成矿亚带矿化演化时间分别为 17(北)、6(中)和 9 Ma(南),这一现象的存在为区域矿化多样性的产生提供了新的认识:区带上岩浆作用演化时间越长,经历分异阶段越多,分异越大,随岩浆流体带来的成矿物质种类也越为丰富;其对应的流体演化持续时间也会越长,热液运移距离、与地层的水岩交换作用等也会随之增强,从而形成具有更大成矿潜力、更多矿种组合共存的矿床。

致谢 野外工作得到了列廷冈和勒青拉矿区领导和工作人员的大力支持和帮助;室内白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年在中国地质科学院地质研究所的同位素实验室工作人员的大力帮助下完成;稿件完成过程中,审稿专家和编辑阅读了全文并提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

References

- Bi Hua, Wang Zhonggang, Wang Yuanlong, *et al.* 1999. History of tectonic-magmatic evolution in the Western Kunlun orogenic belt [J]. Science in China(Series D), 29(5): 398~406(in Chinese).
- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, *et al.* 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. Nature, 412: 628~632.

- Chen Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, *et al.* 2011. Isotope Geochronology: Technique and Application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (11): 1 917~1 947(in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, *et al.* 2006. Late Cenozoic 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).
- Ding Lin, Kapp Paul, Zhong Dalai, *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. *Journal of Petrology*, 44: 1 833~1 865.
- Dodson M H. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 40: 259~274.
- Du Denghu, Yang Zhiming, Li Qiuyun, *et al.* 2012. Determination of Eocene porphyritic monzogranite intrusions in Tinggong ore district of Tibet and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 31 (4): 745~757(in Chinese with English abstract).
- Du Xin, Yan Changhai, Chen Junkui, *et al.* 2010. Geologic feature of the Yaguila Pb-Zn-polymetallic deposit in Tibet[J]. *Geological Survey and Research*, 33 (4): 257~265(in Chinese with English abstract).
- Duan Lianfeng, Li Wei, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2014. Post-collisional Oligocene metallogenic process in southern margin of Gandise belt: Evidence from Re-Os dating of molybdenite from the Pa'n nan porphyry Mo deposit [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(2): 307~316(in Chinese with English abstract).
- Fan Wenyu, Gao Dafa, Zhang Linkui, *et al.* 2007. Geological characteristics of the Leqingla iron deposit, Tibet, and their prospecting significance[J]. *Geology in China*, 34 (1): 110~116(in Chinese with English abstract).
- Fei Fan, Yang Zhusen, Liu Yingchao, *et al.* 2015. Petrogenetic epoch of the rock mass in the Lunggar iron deposit of Coqen Country, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 568~580(in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Huang Kexian, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2015. Ar-Ar age of muscovite from skarn orebody of the Mengya'a lead-zinc deposit in Tibet and its geodynamic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89 (3): 569~582(in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2013. Zircon U-Pb ages, Hf isotope and geochemistry of granodiorite in Jialapu Fe deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 32 (3): 564~578(in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2014. Ar-Ar age of phlogopite from the Longmala copper-iron-lead-zinc deposit in Tibet and its geodynamic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33 (2): 283~293(in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan and Tang Juxing. 2010. SHRIMP zircon U-Pb and amphibole ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of amphibole diorite from Sharang porphyry molybdenum deposit in Gongbo'gyamda County, Tibet, and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 323~331(in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Tang Juxing, *et al.* 2011. Re-Os dating of molybdenite from the Yaguila porphyry molybdenum deposit in Gongbo'gyamda area, Tibet, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 30 (7): 1 027~1 036 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Tang Juxing, *et al.* 2012. A study of diagenetic and metallogenic geochronology of the Dagbo Cu (Mo) deposit in Quxur County of Tibet and its geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 613~623(in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Inger S and Xu R. 1990. Cretaceous plutonism in central Tibet: An example of post-collision magmatism [J]. *Volcan. Geotherm. Res.*, 44: 21~32.
- Hou Zengqian and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibet an collisional orogen: A review and introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews*, 36 (1~3): 2~24.
- Hou Zengqian, Duan Lianfeng, Lu Yongjun, *et al.* 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa Terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Economic Geology*, 110: 1 541~1 575.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, *et al.* 2006d. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. *Mineral Deposits*, 33 (2): 340~351(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Jianan, *et al.* 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25 (5): 521~543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Xiaofei, Li Qiuyun, *et al.* 2013. The giant Dexing porphyry Cu-Mo-Au deposit in east China: Product of melting of juvenile lower crust in an intracontinental setting[J]. *Miner Deposita*, 48: 1 019~1 045.
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Huang Wei, *et al.* 2001. Gangdese por-

- phyry copper deposit is expected to become the second Yulong copper belt in Tibet[J]. Chinese Geology, 28(10): 27~29(in Chinese).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Wang Shuxian, *et al.* 2003. The Molybdenite Re-Os age from Gangdese porphyry copper belt: Mineralization time and the application of dynamic background[J]. Science in China (Series D), 33(7): 609~618(in Chinese).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, *et al.* 2006c. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. Mineral Deposits, 25(6): 629~651(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Tian Shihong, Yuan Zhongxin, *et al.* 2006. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication[J]. Earth and Planetary Science Letters, 244(1): 234~250.
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, *et al.* 2006a. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main-collisional extension setting[J]. Mineral Deposits, 25(4): 337~358(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhiming, Qu Xiaoming, *et al.* 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen[J]. Ore Geology Reviews, 36(1~3): 25~51.
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, *et al.* 2012. Metallogenesis of continental collision setting: Part I. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo systems in Tibet[J]. Mineral Deposits, 31(4): 647~670(in Chinese with English abstract).
- Huang Kexian, Zheng Yuanchuan, Zhang Song, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of two types of porphyry in the Yagula mining area, Tibet[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(3): 348~360(in Chinese with English abstract).
- Ji Xianhua, Meng Xiangjin, Yang Zhusen, *et al.* 2014. The Ar-Ar geochronology of sericite from the cryptoexplosive breccias type Pb-Zn deposit in Narusongduo and its significance[J]. Geology and Prospecting, 50(2): 281~290(in Chinese with English abstract).
- Ji Xianhua, Yang Zhusen, Yu Yushuai, *et al.* 2012. Formation mechanism of magmatic rocks in Narusongduo lead-zinc deposit of Tibet: Evidence from magmatic zircon[J]. Mineral Deposits, 31(4): 758~774(in Chinese with English abstract).
- Julien A, Martin E, Alfons B, *et al.* 2009. Monazite and allanite U-Th-Pb vs mica ^{39}Ar - ^{40}Ar ages in equilibrated metasediments: Closure behavior and closure temperatures[A]. AGU Fall Meeting Abstracts [C].
- Lee T Y and Lawver L A. 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia[J]. Tectonophysics, 251: 85~138.
- Leng Qiufeng, Tang Juxing, Zheng Wenbao, *et al.* 2015. Re-Os dating of molybdenite from the Lakange porphyry Cu-Mo deposit in Tibet and its Geological Significance[J]. Geology in China, 42(2): 570~584(in Chinese with English abstract).
- Li Jianzhong, Wang Gaoming, Gao Dafa, *et al.* 2004. The ore field structures of the Leqingla lead-zinc deposit in Linzhou, Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 24(4): 60~65(in Chinese with English abstract).
- Li Yingxu, Xie Yuling, Chen Wei, *et al.* 2011. U-Pb age and geochemical characteristics of zircon in monzogranite porphyry from Qiagong deposit, Tibet, and geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 2023~2033(in Chinese with English abstract).
- Lin Wu, Liang Huaying, Zhang Yuquan, *et al.* 2004. Petrochemistry and SHRIMP U-Pb zircon age of the Chongjiang ore-bearing porphyry in the Gangdese porphyry copper belt[J]. Geochimica, 33(6): 585~592(in Chinese with English abstract).
- Liu Xin. 2015. Characteristics of Fluid Inclusions in Longmala Pb-Zn Deposit, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingchao, Ji Xianhua, Hou Zengqian, *et al.* 2015. The establishment of an independent Pb-Zn mineralization system related to magmatism: A case study of the Narusongduo Pb-Zn deposit in Tibet[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(4): 539~556(in Chinese with English abstract).
- Liu Yunfei, Yang Zhiming, Xie Yuling, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry of intrusive rocks from Nongruri gold deposit, Gangdese, Tibet[J]. Mineral Deposits, 31(4): 727~744(in Chinese with English abstract).
- Ma Wang, Yang Zhusen, Hou Zengqian, *et al.* 2015. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of metallogenetic rock from the Lietinggang-Leqingla Fe-Cu-Pb-Zn deposit in Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 89(9): 1655~1672(in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, *et al.* 2003. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in East Gangdese Belt, Tibet: Evidence from Re-Os age of molybdenite in Bangpu copper polymetallic deposit[J]. Mineral Deposits, 22(3): 246~252.
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Ye Peisheng, *et al.* 2007. Characteris-

- tics and ore potentiality of Gangdese silver-polymetallic mineralization belt in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 153~162(in Chinese with English abstract).
- Miller G, Schuster R, Klötzli U, *et al.* 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 40: 1399~1424.
- Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, *et al.* 2005. Timing of magma mixing in the Gangdisê magmatic belt during the India-Asia collision, Zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Acta Geol. Sin.*, 79: 66~76.
- Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Niu Yaoling, *et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision, evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 96: 225~242.
- Pan Guitang, Ding Jun, Yao Dongsheng, *et al.* 2004. Guidebook of 1: 1 500 000 Geologic Map of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Adjacent Areas[M]. Chengdu: Cartographic Publishing House, 1~148 (in Chinese).
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521~533(in Chinese with English abstract).
- Qin Zhipeng, Wang Xiongwu, Duoji, *et al.* 2011. LA-ICP-MS U-Pb zircon age of intermediate intrusive rocks in Jiama of Tibet and its metallogenic significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 339~348 (in Chinese with English abstract).
- Rui Zongyao, Li Guangming, Zhang Lisheng, *et al.* 2004. The response of porphyry copper deposits to important geological events in Xizang[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 145~152(in Chinese with English abstract).
- Shang Zhen, Zeng Lingsen, Gao Li'e, *et al.* 2016. Formation mechanism of the Chengba high Sr/Y granodiorite and enclaves in southern Gangdise region, southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 71~90(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiang, Zheng Youye, Wu Song, *et al.* 2013. Mineralization age and petrogenesis of associated intrusions in the Mingze-Chengba porphyry-skarn Mo-Cu deposit, Gangdese[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1392~1406 (in Chinese with English abstract).
- Suzuki K, Hiroshi H and 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): 3151~3159.
- Tang Juxing, Chen Yuchuan, Wang Denghong, *et al.* 2009a. Re-Os dating of molybdenite from the Sharang porphyry molybdenum deposit in Gongbo'gyamda County, Tibet and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 698~704(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Liqiang, Zheng Wenbao, *et al.* 2014. Ore deposits metallogenic regularity and prospecting in the eastern section of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2545~2555(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Zhang Li, Zheng Huangyong, *et al.* 2009b. ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotope ages of main geological bodies in Xiongcu copper-gold deposit, Xietongmen County, Tibet, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 759~769(in Chinese with English abstract).
- Wang Baodi, Xu Jifeng, Chen Jianlin, *et al.* 2010. Petrogenesis and geochronology of the ore-bearing porphyritic rocks in Tangbula porphyry molybdenum-copper deposit in the eastern segment of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1820~1832(in Chinese with English abstract).
- Wang Liangliang, Mo Xuanxue, Li Bing, *et al.* 2006. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyry in Qulong Cu(Mo) ore deposit, Tibet logical characteristics and Re-Os dating of the Hahaigang W-Mo polymetallic deposit, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 1001~1008(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Chen Yuchuan, *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of ore-bearing monzogranite porphyry in Bangpu molybdenum (copper) deposit, Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 349~360(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Wang Huan, *et al.* 2012. Geological characteristics and Re-Os dating of the Hahaigang W-Mo polymetallic deposit, Tibet[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(1): 113~119(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinxin, Ding Jun, Yan Guoqiang, *et al.* 2015. Zircon U-Pb age of the biotite granite of Nuri skarn type Cu-Mo-W deposit in Shan-nan, Tibet and its metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 549~559(in Chinese with English abstract).
- Williams H M, Turner S P, Pearce J A, *et al.* 2004. Nature of the source regions for post-collisional, potassic magmatism in southern and northern Tibet from geochemical variations and inverse trace element modeling[J]. *Journal of Petrology*, 45: 555~607.

- Yan Guoqiang, Zhong Kanghui, Bai Jingguo, *et al.* 2011. Discussion on the genesis of the Dong Zhongla lead-zinc deposit, Tibet[J]. Xinjiang Geology, 29 (2): 212~216(in Chinese with English abstract).
- Yan Xueyi, Huang Shufeng and Du Andao. 2010. Re-Os ages of large tungsten, copper and molybdenum deposit in the Zetang orefield, Gangdisu? and marginal strike-slip transforming metal logenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 84(3): 389~406(in Chinese with English abstract).
- Yang Yi, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.* 2014. Re-Os dating of molybdenite from the Lietinggang iron polymetallic deposit of Tibet and its geological significance[J]. Geology in China, 41(5): 1 554~1 564(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming, Xie Yuling, Li Guangming, *et al.* 2005. Study of fluid inclusions from Tinggong porphyry copper deposit in Gangdese belt, Tibet[J]. Mineral Deposits, 24(6): 584~594.
- Yang Zhiming, Xie Yuling, Li Guangming, *et al.* 2006. SEM/EDS constraints on nature of ore-forming fluids in Gangdese porphyry copper belt: Case studies of Qulong and Tinggong deposits[J]. Mineral Deposits, 25(2): 147~154(in Chinese with English abstract).
- Ying Lijuan, Wang Denghong, Tang Juxing, *et al.* 2010. Re-Os dating of molybdenite from the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet and its metallogenic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 84(8): 1 165~1 174(in Chinese with English abstract).
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Duo Ji, *et al.* 2014. Age and petrogenesis of magmatic rocks from Jiaduobule skarn Fe-Cu deposit in Tibet: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating, Hf isotope and REE [J]. Mineral Deposits, 30(3): 420~434(in Chinese with English abstract).
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Meng Xiangjin, *et al.* 2011. Genesis of Late Cretaceous magmatic activity in the Jiaduobule iron copper deposit, Tibet[J]. Geology and Exploration, 50(2): 216~225(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ke. 2006. Geological characteristics and genesis of Leqingla Pb-Zn deposit in Tibet[A]. Geological Work for Sustainable Development-2006 East China Six Provinces and One City Geosciences Forum Proceedings[C], 132~139(in Chinese with English abstract).
- Zhang Linkui, Fan Wenyu and Gao Dafa. 2008. Geology and genesis of Leqingla Pb-Zn polymetallic deposit in the Linzhou Country, Tibet [J]. Geology and Prospecting, 44(5): 10~16(in Chinese with English abstract).
- Zhang Linkui, Fan Wengu and Gao Dafa. 2012. A discussion on the metallogenic model of the Leqingla iron-lead-zinc deposit, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 673~680(in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Zhang Gangyang, Xu Rongke, *et al.* 2007. The diagenesis and mineralization epoch constraint of Zhu'nuo porphyry copper deposit in Gangdese, Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 52 (21): 2 541~2 548 (in Chinese).
- Zheng Yuanchuan, Fu Qiang, Hou Zengqian, *et al.* 2015. Metallogeny of the northeastern Gangdese Pb-Zn-Ag-Fe-Mo-W polymetallic belt in the Lhasa terrane, southern Tibet[J]. Ore Geology Reviews, 70: 510~532.

附中文参考文献

- 毕 华, 王中刚, 王元龙, 等. 1999. 西昆仑造山带构造-岩浆演化史 [J]. 中国科学(D辑), 29(5): 398~406.
- 陈 文, 万渝生, 李华芹, 等. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. 地质学报, 85 (11): 1 917~1 947.
- 陈 文, 张 彦, 金贵善, 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.
- 杜等虎, 杨志明, 李秋耘, 等. 2012. 西藏厅宫矿区始新世斑岩的厘定及其地质意义[J]. 矿床地质, 31(4): 745~757.
- 杜 欣, 燕长海, 陈俊魁, 等. 2010. 西藏亚贵拉铅锌多金属矿床的地质特征[J]. 地质调查与研究, 33 (4): 257~265.
- 段连峰, 李 为, 郑远川, 等. 2014. 西藏冈底斯南缘碰撞后渐新世成矿作用——来自帕南钨矿床的 Re-Os 同位素年龄证据[J]. 岩石矿物学杂志, 33(2): 307~316.
- 范文玉, 高大发, 张林奎, 等. 2007. 西藏勒克拉铁矿床地质特征及其找矿意义[J]. 中国地质, 34(1): 110~116.
- 费 凡, 杨竹森, 刘英超, 等. 2015. 西藏措勤隆格尔矿岩体成岩时代及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(4): 568~580.
- 付 强, 黄克贤, 郑远川. 2015. 西藏蒙亚啊铅锌矿床矽卡岩型矿体白云母 Ar-Ar 年代学研究及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 89 (3): 569~582.
- 付 强, 杨竹森, 郑远川, 等. 2013. 加拉普铁矿区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地球化学研究[J]. 矿床地质, 32 (3): 564~578.
- 付 强, 杨竹森, 郑远川. 2014. 西藏龙马拉 Cu-Fe-Pb-Zn 多金属矿床金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33 (2): 283~293.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴. 2010. 西藏沙让斑岩钨矿床锆石 SHRIMP

- 定年和角闪石 Ar-Ar 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 29(3): 323~331.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2011. 西藏工布江达地区亚贵拉铅锌钼矿床辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 地质通报, 30(7): 1027~1036.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2012. 西藏曲水县达布班岩铜(钼)矿床成岩成矿年代学研究[J]. 地球学报, 33(4): 613~623.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 2006d. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 33(2): 340~351.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换带成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521~543.
- 侯增谦, 曲晓明, 黄卫, 等. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. 中国地质, 28(10): 27~29.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 等. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用[J]. 中国科学(D辑), 33(7): 609~618.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 2006c. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6): 629~651.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 2006a. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4): 337~358.
- 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 等. 2012. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统[J]. 矿床地质, 31(4): 647~670.
- 黄克贤, 郑远川, 张松, 等. 2012. 西藏亚贵拉矿区两期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(3): 348~360.
- 纪现华, 孟祥金, 杨竹森, 等. 2014. 西藏纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿床绢云母 Ar-Ar 定年及其地质意义[J]. 地质与勘探, 50(2): 281~290.
- 纪现华, 杨竹森, 于玉帅, 等. 2012. 西藏纳如松多铅锌矿床成矿岩体形成机制: 岩浆锆石证据[J]. 矿床地质, 31(4): 758~774.
- 冷秋锋, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2015. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 中国地质, 42(2): 570~584.
- 李建忠, 王高明, 高大发, 等. 2004. 西藏林周县勒青拉铅锌矿床矿田构造特征[J]. 沉积与特提斯地质, 24(4): 60~65.
- 李应栩, 谢玉玲, 陈伟, 等. 2011. 西藏恰功铁矿二长花岗岩斑岩锆石的 U-Pb 年代学与地球化学特征及意义[J]. 岩石学报, 27(7): 2023~2033.
- 林武, 梁华英, 张玉泉, 等. 2004. 冈底斯铜矿带冲江含矿斑岩的岩石化学及锆石 SHRIMP 年龄特征[J]. 地球化学, 33(6): 585~592.
- 林鑫. 2015. 西藏龙马拉铅锌矿流体包裹体特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘英超, 纪现华, 侯增谦, 等. 2015. 一个与岩浆作用有关的独立铅锌成矿系统的建立——以西藏纳如松多铅锌矿床为例[J]. 岩石矿物学杂志, 34(4): 539~556.
- 刘云飞, 杨志明, 谢玉玲, 等. 2012. 西藏弄如日金矿床侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 矿床地质, 31(4): 727~744.
- 马旺, 杨竹森, 侯增谦, 等. 2015. 西藏列廷冈-勒青拉 Fe-Cu-Pb-Zn 矿区成矿岩体锆石 U-Pb 年代学与岩石地球化学特征研究[J]. 地质学报, 89(9): 1655~1672.
- 孟祥金, 侯增谦, 叶培盛, 等. 2007. 西藏冈底斯银多金属矿化带的基本特征与成矿远景分析[J]. 矿床地质, 26(2): 153~162.
- 潘桂棠, 丁俊, 姚东生, 等. 2004. 青藏高原及邻区 1:150 万地质图说明书[M]. 成都: 地图出版社. 1~148.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 秦志鹏, 汪雄武, 多吉, 等. 2011. 西藏甲玛中酸性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义[J]. 矿床地质, 30(2): 339~348.
- 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 等. 2004. 西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应[J]. 地学前缘, 11(1): 145~152.
- 尚振, 曾令森, 高利娥, 等. 2016. 藏南冈底斯南缘程巴岩体高 Sr/Y 花岗岩闪长岩和包体形成机制及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 地质通报, 35(1): 71~90.
- 孙祥, 郑有业, 吴松, 等. 2013. 冈底斯明则-程巴斑岩-夕卡岩型 Mo-Cu 矿床成矿时代与含矿岩石成因[J]. 岩石学报, 29(4): 1392~1406.
- 唐菊兴, 陈毓川, 王登红, 等. 2009a. 西藏工布江达县沙让斑岩钼矿床辉钼矿铼-钼同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 83(5): 698~704.
- 唐菊兴, 王立强, 郑文宝, 等. 2014. 冈底斯成矿带东段矿床成矿规律及找矿预测[J]. 地质学报, 88(12): 2545~2555.
- 唐菊兴, 张丽, 黄勇, 等. 2009b. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 28(6): 759~769.
- 王保弟, 许继峰, 陈建林, 等. 2010. 冈底斯东段汤不拉斑岩 Mo-Cu 矿床成岩成矿时代与成因研究[J]. 岩石学报, 26(6): 1820~1832.
- 王亮亮, 莫宣学, 李冰, 等. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 22(4): 1001~1008.
- 王立强, 唐菊兴, 陈毓川, 等. 2011. 西藏邦铺钼(铜)矿床含矿二长花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿床地

- 质, 30(2): 349~360.
- 王立强, 唐菊兴, 王 焕, 等. 2012. 西藏哈海岗钨钼多金属矿床地质特征及辉钼矿铼-钨同位素定年[J]. 岩矿测试, 31(1): 113~119.
- 王欣欣, 丁 俊, 闫国强, 等. 2015. 西藏山南努日矽卡岩型铜钼钨矿床黑云母花岗岩锆石 U-Pb 定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 89(3): 549~559.
- 闫学义, 黄树峰, 杜安道. 2010. 冈底斯泽当大型钨铜钼矿 Re-Os 年龄及陆缘走滑转换成矿作用[J]. 地质学报, 84(3): 398~406.
- 杨 毅, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2014. 西藏列廷冈铁多金属矿床辉钼 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 41(5): 1 554~1 564.
- 杨志明, 谢玉玲, 李光明, 等. 2006. 西藏冈底斯斑岩铜矿带成矿流体的扫描电镜(能谱)约束——以驱龙和厅宫矿床为例[J]. 矿床地质, 25(2): 147~154.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 等. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 84(8): 1 165~1 174.
- 于玉帅, 杨竹森, 多 吉, 等. 2011. 西藏加多捕勒铁铜矿成矿岩体时代与成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素与稀土元素证据[J]. 矿床地质, 30(3): 420~434.
- 于玉帅, 杨竹森, 孟祥金, 等. 2014. 西藏加多捕勒铁铜矿床晚白垩世岩浆活动成因[J]. 地质与勘探, 50(2): 216~225.
- 张 科. 2006. 西藏勒青拉铅锌矿床的岩浆热液交代成因: 地质与地球化学成因[A]. 加强地质工作促进可持续发展——2006 年华东六省一市地学科技论坛论文集[C]. 132~139.
- 张林奎, 范文玉, 高大发. 2008. 西藏林周县勒青拉铅锌多金属矿床地质特征及成因[J]. 地质与勘探, 44(5): 10~16.
- 张林奎, 范文玉, 高大发. 2012. 西藏勒青拉铁铅锌矿床成矿模式讨论[J]. 地球学报, 33(45): 673~680.
- 郑有业, 张刚阳, 许荣科, 等. 2007. 西藏冈底斯朱诺斑岩铜矿床成矿时代约束[J]. 科学通报, 25(21): 2 542~2 548.