

doi: 10.12029/gc20190108

梁维, 郑远川. 2019. 藏南吉松铅锌矿成矿时代的厘定: 热液绢云母 Ar-Ar 年龄[J]. 中国地质, 46(1): 126–139.

Liang Wei, Zheng Yuanchuan. 2019. Hydrothermal sericite Ar-Ar dating of Jisong Pb-Zn deposit, Southern Tibet[J]. Geology in China, 46(1): 126–139(in Chinese with English abstract).

藏南吉松铅锌矿成矿时代的厘定： 热液绢云母 Ar-Ar 年龄

梁维¹, 郑远川²

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 吉松脉状铅锌多金属矿位于特提斯喜马拉雅东段中部, 是该带内新近发现的铅锌矿床。吉松铅锌矿矿脉产于数条北东向断裂之中, 以石英-方解石-硫化物脉形式充填断裂破碎带。本文采用 Ar-Ar 同位素年代学方法对石英-硫化物脉中的绢云母进行了测试分析, 在 760–860℃ 温度区间获得绢云母的坪年龄为 (16.61 ± 0.30) Ma, 对应的等时线年龄为 (16.64 ± 0.30) Ma。两组年龄在误差范围内相等, 能够代表绢云母的形成时间。该 Ar-Ar 年龄指示了吉松铅锌矿形成于 17 Ma 左右。特提斯喜马拉雅成矿带在主碰撞成矿阶段发育一期金(银)矿化事件(59–49 Ma), 而以吉松为代表的铅锌矿化事件则集中于后碰撞阶段(21–12 Ma)。由于吉松铅锌矿与错那洞淡色花岗岩体密切的时空关系, 结合二者相似的铅同位素关系, 暗示错那洞淡色花岗岩为吉松铅锌成矿提供了物源和热驱动力。

关 键 字: 特提斯喜马拉雅; 吉松; Ar-Ar 年龄; 藏南; 铅锌矿

中图分类号: P618.42–43; P597+.3 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2019)01–0126–14

Hydrothermal sericite Ar-Ar dating of Jisong Pb-Zn deposit, Southern Tibet

LIANG Wei¹, ZHENG Yuanchuan²

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. School of Earth and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Jisong Pb-Zn deposit is one of the newly found deposits in the Tethys Himalaya belt. Orebodies mainly occur as veins in several nearly NE-striking faults. The veins are mainly composed of quartz, calcite, and sulfides. Hydrothermal sericite is genetically associated with zinc and lead mineralization and coexists with quartz, calcite, pyrite, sphalerite and galena. These sericite grains were separated for Ar-Ar isotopes dating. The results yielded a plateau age of (16.61 ± 0.30) Ma at 760–860℃, with the corresponding isochron age being (16.64 ± 0.30) Ma. These two ages are the same within the error, indicating that they can represent the formation age of the Jisong Pb-Zn deposit. Tethys Himalaya developed an Au (Ag) mineralization event in the main collisional orogenic setting, and the Ar-Ar age of the Jisong deposit indicates that Pb-Zn mineralization represented by Jisong in South Tibet occurred at late collisional stage. Combined with close spatial relationships as well as the similarities in time and Pb isotopes

收稿日期: 2017–03–10; 改回日期: 2018–06–02

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2016YFC0600308)、中国地质调查局项目“冈底斯—喜马拉雅铜矿资源基地调查”(DD20160015)和国家自然科学基金项目(41702080)共同资助。

作者简介: 梁维, 男, 1986 年生, 博士, 工程师, 长期从事青藏高原岩浆和矿床相关研究; E-mail: lwcugb@126.com。

between the Jisong deposit and the Cuonadong leucogranite, the authors hold that the leucogranite possibly offered material and heat to the Jisong ore-forming hydrothermal system.

Key words: Tethyan Himalaya; Jisong; Ar–Ar dating; South Tibet; Pb–Zn deposit

About the first author: LIANG Wei, male, born in 1986, doctor, engineer, engages in the study of magma and mineral deposits in the Tibetan Plateau; E-mail: lwcugb@126.com.

Fund support: Supported jointly by National Key Research and Development Project of Ministry of Science and Technology (No. 2016YFC0600308), Project of China Geological Survey (No. 2016YFC0600308), National Natural Science Foundation (No. 41702080).

1 引言

特提斯喜马拉雅带是青藏高原南部重要的铅锌金锑多金属成矿带,带内产出数十个铅锌、金、锑矿床。前人对特提斯喜马拉雅带主要的铅锌、金锑的成矿地质特征、控矿要素、成矿物质来源、矿床成

因等进行过研究(郑有业等,2001;李金高等,2002;聂凤军等,2005;侯增谦等,2006a;侯增谦等,2006b;杨竹森等,2006;郑有业等,2007,2012;戚学祥等,2009;张洪瑞托,2010;梁维等,2014;2015),取得一系列成果。然而,成矿年代学方面的研究却相对滞后,可靠的成矿年龄数据相对较少。仅少数

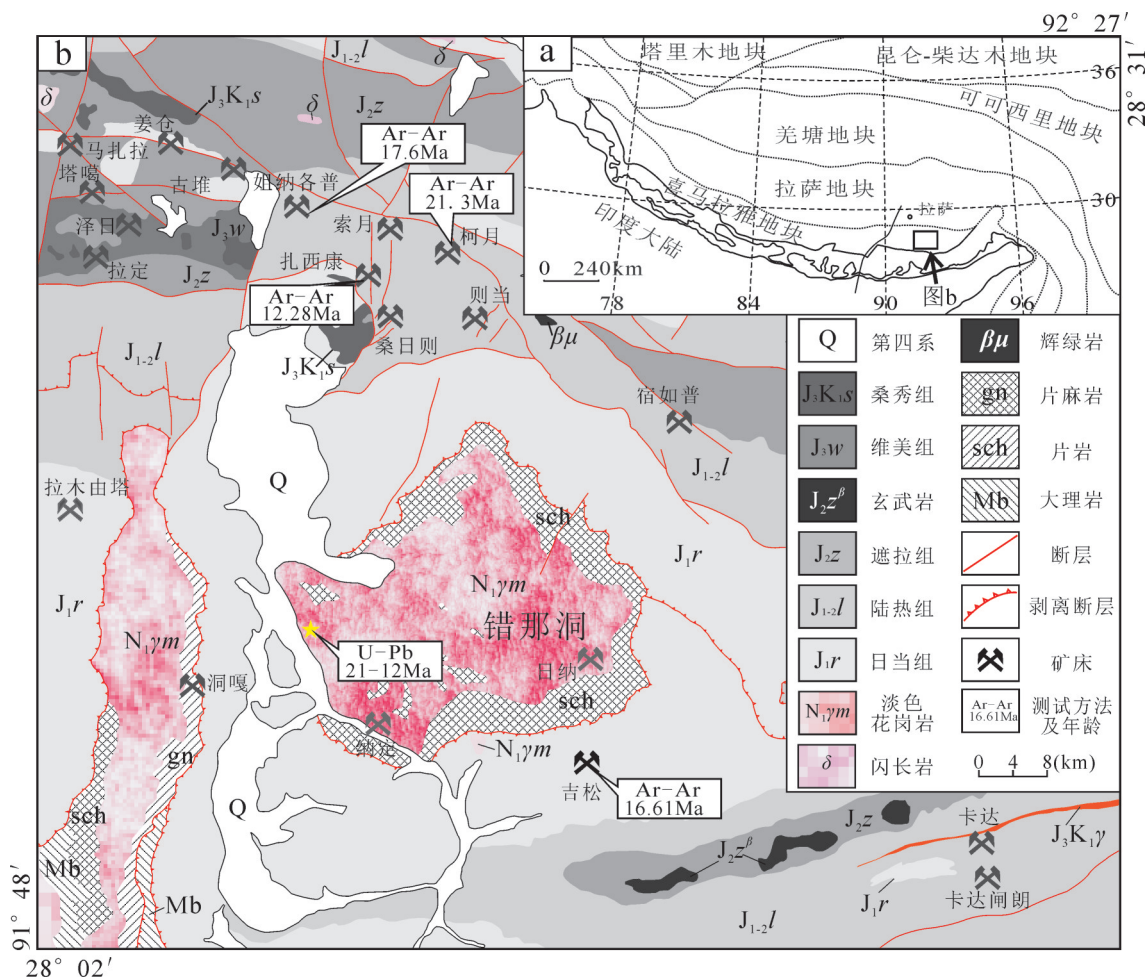


图1 青藏高原大地构造位置简图(a)和藏南扎西康铅锌多金属矿集区矿产地质图(b)

Fig.1 Simplified map of tectonic boundaries and units of the Tibetan Plateau (a) and geological map of the Zhaxikang Pb–Pb polymetallic ore concentration area (b)

矿床获得可靠成矿放射性同位素年龄,如柯月铅锌多金属矿(林彬等,2016)、扎西康铅锌多金属矿(梁维等,2015)、邦布岩金矿(Pei Yingru et al., 2016)、查拉普金矿(张刚阳,2012)等。获取精度更高的放射性同位素年龄,可以更好地探索该带成矿时代。经过详细的矿区调查,许多矿床均存在富K类矿物,可以帮助我们获取更为精确的成矿年龄。

吉松铅锌矿位于山南地区错那县吉松村,是藏南扎西康铅锌多金属矿集区内铅锌矿的典型代表(图1)。尹远等(2015)对该矿床地质特征、成矿流体特征进行了研究,表明该矿床为中低温热液脉型铅锌矿床。但是,成矿年龄的缺失,导致探讨成矿作用变得薄弱。本次工作在石英-方解石-硫化物脉中发现了共生绢云母,适合拟定其形成时代。在回答吉松铅锌矿何时成矿的同时,可以丰富区域成矿年代学资料。

2 成矿地质背景

喜马拉雅地体是青藏高原的重要组成部分,夹持于雅江缝合带和主边界断裂之间(Harrison et al., 1992; Yin and Harrison, 2000),由藏南拆离系和主中央逆冲断层两条东西向北倾深大断裂将其自北向南分隔成了特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅3个微地体(LeFort, 1975; 尹安, 2001)。特提斯喜马拉雅广泛发育侏罗-白垩系海相碎屑岩沉积、三叠系海相碎屑岩沉积,零星分布古生代地层及元古宙古老变质基底。在特提斯喜马拉雅微地块中部东西向分布着数个串珠状的穹隆构造(Burchfiel, 1992; Hauck et al., 1998; Lee et al., 2000, 2004),如也拉香波、康马等穹隆(于涛等, 2007; 张进江等, 2007; 曾令森等, 2009; 胡古月等, 2011)。最新地质调查显示错那洞-空布岗也存在穹隆构造的特征。穹隆构造发育的时间集中在18~13.5 Ma(刘文灿等, 2004; 张进江等, 2007, 2011)。穹隆内出露中新元古代变质地层和古生代-中生代的沉积岩系(Burg et al., 1984; Harrison et al., 1997; 张进江等, 2007)和淡色花岗岩以及具有埃达克岩性质的始新世二云母花岗岩(Hou et al., 2012)。大量东西向基性-中基性岩墙群集中于138 Ma左右侵位(童劲松等, 2007),与该地区同时期桑秀组中英安岩等酸性火山岩形成“双峰式”火山岩组合。

藏南特提斯喜马拉雅带产出许多金、金锑、锑铅锌、铅锌等不同金属元素组合矿床(聂凤军等, 2005; 戚学祥等, 2008)。主要位于特提斯喜马拉雅中东部地区。典型矿床(点)如浪卡子金矿、马攸木金矿、扎西康铅锌多金属矿、马扎拉金锑矿和吉松铅锌矿等。这些金锑铅锌矿床多受构造控制,显示出后期成矿的特征,空间上与构造穹隆和藏南拆离系关系密切(聂凤军等, 2005; 杨竹森等, 2006)。

3 矿床地质特征

吉松铅锌矿位于特提斯喜马拉雅带东段(图1a),羊卓雍错-拿日雍错复式向斜的南东端。

3.1 矿区地层

吉松矿区出露下侏罗统日当组(J₁r)一套浅变质的海相碎屑沉积岩和第四系风化堆积物(图2)。

日当组地层在吉松以绢云母板岩、含炭绢云母板岩为主,见少量粉砂质粉晶板岩和钙质千枚岩。

绢云母板岩^①:主要分布在矿区西北部,约占矿权范围内岩层的80%左右,为矿区主要岩性。灰-浅灰色,具粒状、鳞片变晶结构、显微鳞片粒状变晶结构,板状构造。主要矿物:绢云母+钠长石70%、石英15%、绿泥石5%、炭质及铁质10%。②含炭质绢云母板岩:主要分布于矿区北东部,约占测区岩层的10%;岩石结构构造基本同绢云母板岩,炭质约占25%,致使岩石颜色较深,呈灰-深灰色,为主要的含矿地层。③粉砂质粉晶板岩:主要分布在岩脉的接触带附近。深灰色,具显微粒状鳞片变晶结构,板状构造。岩石成分主要有绿泥石、绢云母、方解石、隐-微晶长石、石英集合体,尘状炭、铁质等。多呈薄层状、透镜状,分布于板岩中。④钙质千枚岩:灰黄色,中粒变晶结构,千枚状构造。主要矿物:方解石>65%,少量泥质和岩屑。单层一般1~3 cm,多呈夹层分布与绢云母板岩中。

第四系主要为风化残坡积堆积物和冲洪积物。残坡积物主要分布在地势相对平缓的坡麓地带,成分主要为拉康组绢云母板岩砾石、砂和黏土,厚度较厚,可达10 m。砾石直径较小,多成片状、直径小于10 cm。砾石中还夹杂部分石英砾和含黄铁矿、毒砂的方解石砾。冲洪积物发育较少,主要呈带状分布于矿区南侧和北东侧的沟谷之中(图2),呈延伸广、坡度较缓的扇形地貌,形成冲洪积台地。

3.2 矿区岩浆岩

吉松矿区岩脉较发育,主要为辉绿(玢)岩和闪长玢岩两种岩脉。脉体多呈北东向展布,宽度不一,长度不等,出露宽度一般1~50 m,可见延长10~400 m不等。

辉绿(玢)岩主要分布于矿区中北部,岩脉呈北东向展布,与含矿断裂走向平行(图2)。脉体长度约450 m,宽30~50 m。灰绿-浅灰绿色,经历较强的风化作用,风化面褐黄色,辉绿结构、鳞片粒状变晶结构以及斑状-似斑状结构,块状构造。矿物由辉石(50%~65%)、斜长石(30%~45%)两种主要矿物,含少量的橄榄石、角闪石、钾长石,副矿物为钛铁矿、磁铁矿和黄铁矿等。岩脉发了弱碳酸盐化和硅化。

闪长(玢)岩:岩石氧化面灰黄、灰白色,表面多具风化残留2~5 mm孔洞。变余斑状结构,少量变余半自形粒状结构,块状构造。斑晶15%~35%,基质65%~85%。矿物成分:蚀变及次生矿物>45%,主要为黏土矿物和碳酸盐矿物(以方解石为主),次为石英及氧化铁,副矿物磁铁矿。镜下特征:斑晶粒径一般0.5~7mm,岩体灰白色,由斜长石(50%~60%)、角闪石(20%~30%)、黑云母(<5%)和少量的石英组成,主要被碳酸盐矿物、氧化铁质交代成假象。基质中粘土矿物和微晶石英常呈矿物假象集

合体产出,假象大小一般0.1~0.3 mm,氧化铁质常呈矿物假象产出,假象大小一般0.1~0.44 mm,从形态上判断应为黑云母。

岩脉与矿体空间关系并不明显,在岩体及岩体外接触带一般无矿化,见零星黄铁矿。

3.3 矿区构造

矿区断裂发育,至少发育有8条具有一定规模的断裂(表1)。F1和F2断裂规模较大,延长1~3 km不等,出露宽度0.5~20 m不等,具有代表性。是矿区最重要的控矿构造,控制了矿区的主要矿体位置和形态。

F1断裂走向呈北东向,倾向北西,延伸长度大于2400 m,断裂带宽度变化于2.5~18 m,倾角变化于65°~85°(表1)。断裂带表现为硅化破碎,形成构造角砾岩,角砾大小数厘米至几十厘米,角砾岩成分主要为含炭绢云母板岩及千枚岩,胶结物主要为硅质;沿裂隙多有毒砂矿化硅化石英细脉充填,脉宽2~50 cm,两侧岩石紊乱,局部发育片理化。F2断裂位于F1断裂北侧,平行于F1,产状与F1几乎相同。该断裂延长大于2500 m,宽3~50 m不等。F2切割了日当组绢云母板岩,表现为岩石强烈硅化破碎及片理化带,常形成构造角砾岩,且多为硅质及铁质胶结,破碎带内较多石英脉沿裂隙充填,且多

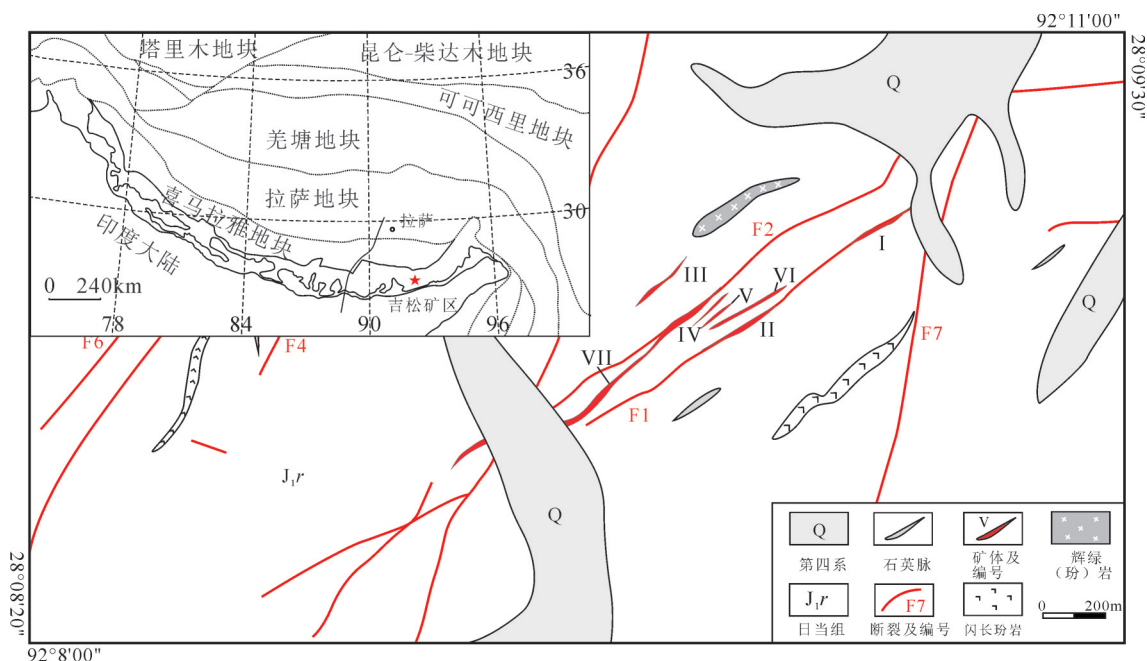


图2 藏南吉松铅锌矿地质简图

Fig.2 Geological map of the Jisong Pb-Zn deposit in southern Tibet

有蚀变矿化现象,脉宽2~100 cm不等。破碎带中角砾一般5~10 cm,最大可达50 cm(图3a)。破碎带中广泛发育石英-方解石-硫化物矿化(图3a、b),是矿区主要含矿断裂。断裂带两侧地层发育的次级裂隙和破碎带也是重要的富矿空间。F2断裂南西端被近南北向F3断裂切割,表明北东向断裂早于近南北向断裂。

3.4 矿化特征

吉松矿脉均受北东向断裂构造控制。脉体多呈透镜状、脉状产出于断裂破碎带或者断裂两侧的地层节理之中,具有明显后生成矿特征。矿区目前共发现7条矿体,矿脉产状变化较大,走向北东,倾向北西,倾角50°~80°不等。脉体长度75~350 m,宽度普遍较小,0.1~2.5 m不等。

矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿和少量磁黄铁矿、黄铜矿。脉石矿物主要为石英、方解石、毒砂,其次为黄铁矿,含少量的绢云母、菱铁矿等。吉松铅锌矿结构较为简单,矿石结构主要有中细粒他形一半自形结构、粗粒自形结构、交代残余结构、骸晶结构、穿插结构等等。矿石构造主要为脉状-网脉状构造、块状构造(图3c)、裂理构造以及角砾状构造。

矿体围岩蚀变较弱,要沿着断裂呈带状分布。吉松的蚀变矿物主要有黄铁矿、毒砂、石英、方解石、绢云母等。石英、黄铁矿、毒砂与铅锌矿化关系密切(图3b)。

根据脉体穿切关系、矿物共生组合,拟定了吉松铅锌矿成矿的4个阶段:(I)方铅矿-毒砂-黄铁矿阶段、(II)磁黄铁矿-闪锌矿-黄铜矿-石英阶段、(III)石英-方解石-黄铁矿阶段和(IV)石英阶段(图4)。

(I)方铅矿-毒砂-黄铁矿阶段:该阶段主要以中-粗粒块状、角砾状方铅矿、黄铁矿、毒砂共生为特征,包裹于石英-硫化物脉中(图3c)。受构造作用,出现变形、裂痕及裂纹构造(图3d)。镜下常见受到后期热液溶蚀,被磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿交代现象,形成交代残余结构(图3e)。

(II)磁黄铁矿-闪锌矿-黄铜矿-石英阶段:该阶段是磁黄铁矿和闪锌矿大量出现的阶段,主要与石英脉共生产出。一般为他形一半自形粒结构,脉状、网脉状构造。该阶段主要溶蚀、交代第一阶段方铅矿、毒砂和黄铁矿。闪锌矿中出现黄铜矿和磁黄铁矿的“病毒”(图3f)。发育少量绢云母,一般出现在石英-硫化物脉壁(图3b)。

(III)石英-方解石-黄铁矿阶段:该阶段产出热液晚期的方解石和石英,多见于断裂破碎带外围,含有少量的黄铁矿,偶见菱铁矿。

(IV)石英阶段:矿化最晚阶段产物,几乎没有硫化物出现,穿切了早阶段矿物(图3c)。

4 样品制备及测试结果

本次实验运用Ar/Ar同位素方法测定了绢云母(JS13-2-2)的年龄。实验样品采自吉松II号矿体样品。从手标本和镜下特征观察,绢云母样品新鲜,未受到蚀变影响。绢云母呈白色,与石英、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿共生(图3b)。

将选取的样品经过破碎、筛选至60~80目,在双目镜下挑选使绢云母的纯度大于99%,用超声波清洗。选取清洗后的样品36.25 mg,封进石英瓶中,并置于中国原子能科学研究院“游泳池核”核反应堆

表1 藏南吉松铅锌矿断裂构造特征

Table 1 Characteristics of fault system of the Jisong Pb-Zn deposit in southern Tibet

编号	出露长度/m	倾向	倾角	性质	断裂特征
NE	F1 >2400	NW	65~85°	逆断层	断裂宽2.5~18 m,发育构造角砾岩,见石英细网脉充填裂隙
	F2 >2500	SE	60~85°	逆断层	断裂带宽3~50 m,出露铅锌硫化物
	F8 >800	NW	60°	正断层	断裂破碎带宽2m左右,见石英脉
NNE	F3 >2950	SEE	50~65°	正断、走滑	断裂带宽5~45 m,两盘岩性为绢云母板岩夹粉砂岩,局部见黄铁矿等硫化物
	F4 >2350	NWW	35°	正断	断裂带宽5~10 m,见硅化和黄铁矿化
	F5 >1700	SEE	20~45°	正断层	断层带宽1~5 m,岩石破碎,裂隙发育
	F6 >1500	SEE	35°	逆断层	破碎带宽0.5~2 m,石英脉发育
	F7 >1200	SEE	30~55°	正断、走滑	破碎带宽0.5~10 m,石英脉发育

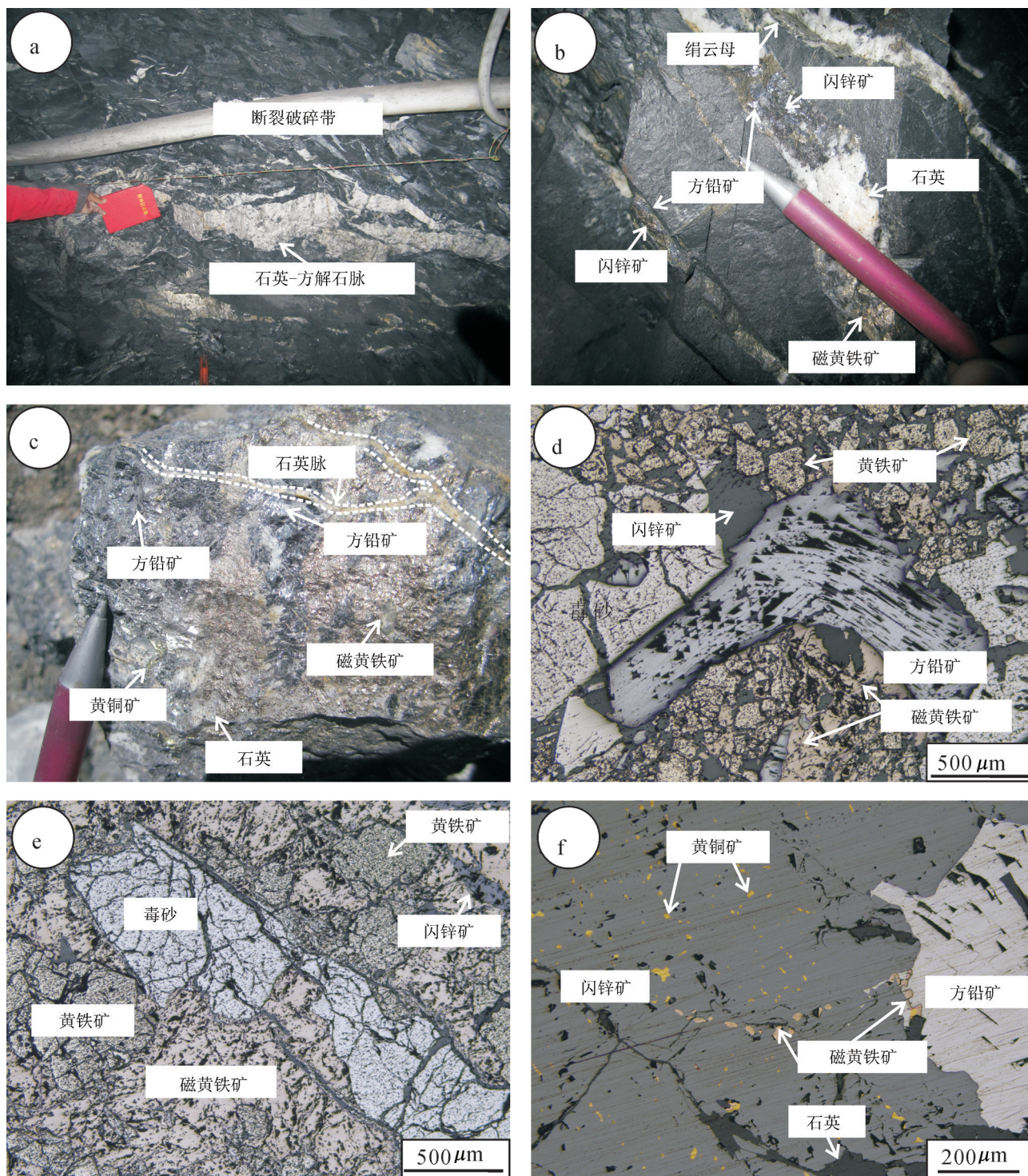


图3 藏南吉松铅锌矿矿石结构构造

Fig.3 Ore texture and structure of the Jisong Pb-Zn deposit in southern Tibet

中接受中子照射。使用B4孔道,中子流密度约为 $2.65 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ S}^{-1}$ 。照射总时间为1456 min,积分中子通量为 $2.30 \times 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$;同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样: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。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪Helix MC上进行的,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。测试工作在中国地质科学院地质研究所Ar-Ar实验室完成。具体实验流程及实验参数见陈文等(2006)。实验数据使用ISOPLOT程序计算坪年龄及正、反等时线,坪年龄误差以 1σ 给出。

Ar-Ar实验一共经历11个阶段的加热过程,从700℃逐渐升温到1400℃,形成了一个扰动的年龄谱(表2),获得加权平均年龄为17.0 Ma。在760~860℃获得了一个理想的坪年龄为 $(16.64 \pm 0.20) \text{ Ma}$;等时线为 $(16.61 \pm 0.30) \text{ Ma}$,初始 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 比值为 295 ± 21 ,MSWD为1.7(图5)。

5 讨 论

5.1 矿床成矿时代

Ar-Ar法是通过对比矿体中与矿石矿物密切共生的富K矿物(绢云母)的放射性定年,获取成矿的间接年龄,该方法已经广泛应用于成矿年代学研究。

本次研究在吉松铅锌矿中选择的绢云母与铅锌矿密切共生,是精确厘定该矿铅锌成矿时限的理想对象。分析结果显示,吉松铅锌矿Ar-Ar阶段加热试验在700~1400℃获得加权平均年龄为17 Ma,而在760℃~860℃等时线年龄为 $(16.61 \pm 0.30) \text{ Ma}$,坪年龄为 $(16.64 \pm 0.30) \text{ Ma}$ (图5),二者在误差范围内相同,年龄可靠。

同位素年龄记录的是矿物低于封闭温度之后的冷却年龄,而绢云母的Ar同位素的封闭温度约400℃。藏南吉松铅锌矿形成温度不超过350℃(尹远等,2015),与藏南金锑铅锌成矿带的成矿温度相近,且属于青藏高原后碰撞造山的产物。因此,适合应用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 等方法对成矿热事件进行年龄测定。在藏南地区有使用Ar同位素进行年龄分析的成功实例:如扎西康铅锌多金属矿富锑矿化期绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为12~17.9 Ma(梁维等,2015;Sun et al., 2014, 2017),柯月铅锌多矿绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为21.3 Ma,姐纳各普金矿绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为17.6 Ma等(董随亮等,2017)。

因此,吉松铅锌矿与铅锌矿物共生的绢云母Ar-Ar年龄能够代表该矿成矿年龄,成矿热液形成于17 Ma左右,属于印度-亚洲大陆碰撞的后碰撞阶段产物。

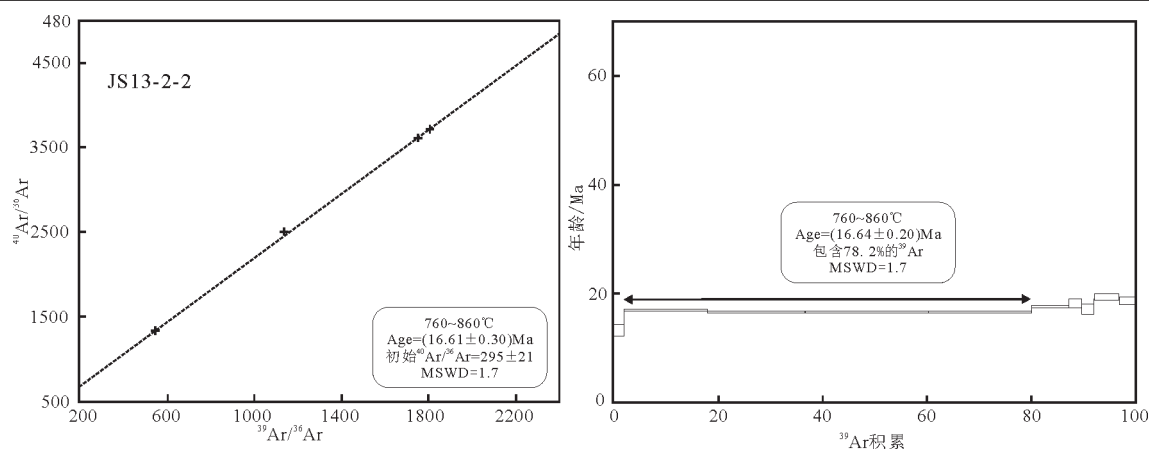
5.2 对区域成矿时代的启示

特提斯喜马拉雅金锑铅锌多金属成矿带产出中低温热液脉型金矿、金锑矿、铅锌锑矿和铅锌矿

矿物	I 方铅矿-毒砂 黄铁矿阶段	II 磁黄铁矿-闪锌矿- 黄铁矿 石英阶段	III 石英-方解石- 黄铁矿阶段	IV 石英阶段
方铅矿	—————			
毒砂	—————			
黄铁矿	—————	—————	—————	
磁黄铁矿		—————		
黄铜矿		—————		
闪锌矿		—————		
石英		—————	—————	—————
绢云母		—————		
方解石			—————	
菱铁矿			—————	

图4 藏南吉松铅锌矿成矿作用阶段划分及矿物组成

Fig. 4 Metallogenic stage of the Jisong Pb-Zn deposit in southern Tibet

图5 藏南吉松铅锌矿绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 等时线年龄及坪年龄图Fig.5 The ^{40}Ar - ^{39}Ar isochron and spectrum age diagram of sericite in the Jisong Pb-Zn deposit in southern Tibet

(聂凤军等, 2004; 杨竹森等, 2006; 戚学祥等, 2008), 最新研究认为还具有铍稀有金属成矿的潜力(王汝成等, 2016; 李光明等, 2017; 张志等, 2017), 现代温泉也显示此处较强的稀有元素富集(许鹏等, 2018), 但是这些稀有金属及稀散金属形成时代研究依然相对滞后。近年报道了一些年龄报道, 这些年龄主要是石英ESR年龄(表3), 但由于封闭温度较低等因素制约, 其可靠性并不十分高。此外, 几个矿床也获得了放射性同位素年龄, 如邦布岩金矿、马攸木金矿具有可靠的绢云母 Ar-Ar 年龄, 它们形成时间分为 49.52 Ma (Pei et al., 2016)、59.34 Ma (江思宏等, 2008); 而柯月、查拉普、姐纳各普、吉松绢云母或伊利石 Ar-Ar 年龄分别为 21.3 Ma、16.7 Ma、17.6 Ma 和 16.6 Ma (林彬等, 2016a; 董随亮等, 2017); 另外, 马扎拉金矿成矿时代晚于 23.6 Ma (张建芳等, 2011)。扎西康铅锌多金属矿是一个特殊的情况, 具有多期多阶段的成矿作用(梁维等, 2014), 从与矿石共生绢云母 Ar-Ar 年龄得到佐证, 其晚期成矿作用发生在 17.9~12.28 Ma (梁维等, 2015; Sun et al., 2014, 2017), 早期铅锌硫化物形成于约 43 Ma (Zhou et al., 2018)。以上这些成矿年龄主要强调喜马拉雅造山带在碰撞过程中主要存在两期成矿事件, 分别为 59~49 Ma 阶段金矿化和 21~12 Ma 阶段铅锌金矿化。

已有的可靠成矿年龄表明, 藏南铅锌金矿成矿事件从 21 Ma 开始, 可以延续到 12 Ma, 而 16~18 Ma 可能是该带成矿集中爆发期(董随亮等, 2017)。吉

松铅锌矿、柯月铅锌矿、扎西康后期铅锌矿(后期)等铅锌矿的绢云母 Ar-Ar 年龄获得, 进一步证实了藏南铅锌成矿作用主要发生在后碰撞阶段, 与低温热液脉型铍金矿化成矿作用时期相同。

综上, 特提斯喜马拉雅带在碰撞造山的 3 个重要阶段均出现了重要的矿化事件, 分别为 59~49 Ma 金矿化事件, 约 43 Ma 铅锌矿化事件及 21~12 Ma 铅锌金矿化事件, 而后碰撞阶段(25~0 Ma)是喜马拉雅铅锌金矿成矿作用的爆发期, 许多金矿、金铍矿、铍矿、铅锌多金属矿等均形成于该时期。

5.3 对成矿作用的启示

青藏高原南部典型的造山型金矿床(江思宏等, 2009; 孙晓明等, 2010; Zhai et al., 2014a, 2014b)形成于 59~49 Ma, 为青藏高原主碰撞汇聚挤压成矿阶段。主要产出于特提斯喜马拉雅北侧的雅鲁藏布江缝合带中, 成矿作用与区域性南北向挤压应力作用下的变质流体有关。藏南金铍铅锌成矿为中低温热液型铅锌多金属矿床, 形成于后碰撞阶段(侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d)。主要围绕特提斯喜马拉雅构造带中部穹隆构造分布, 与青藏高原造山后期地壳伸展减薄而引起的中下地壳部分熔融形成的淡色花岗岩相关, 如扎西康铅锌多金属矿与南侧的错那洞淡色花岗岩及伟晶岩关系密切(Xie et al., 2017)。藏南存在北喜马拉雅(NHL)和高喜马拉雅(HHL)两条淡色花岗岩带。前者形成时代为 10~20 Ma (张金阳和廖群安 2005; 吴福元等, 2015)。典型的如定结地区淡色花岗岩(~15.8

表2 藏南吉松铅锌矿绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar测年实验结果Table 2 Sericite ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating data of Zhaxikang Pb-Zn polymetallic deposit, southern Tibet

序号	T/°C	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar/%	³⁹ Ar(累计)/%	年龄/Ma	±1σ/Ma
1	700	6.1330	0.0157	24.50	1.71	13.2	1.0
2	760	2.2007	0.0009	88.01	17.66	16.94	0.22
3	800	2.0678	0.0006	91.60	36.40	16.57	0.21
4	830	2.0615	0.0006	91.83	60.08	16.56	0.18
5	860	2.4368	0.0018	77.74	79.90	16.57	0.18
6	890	2.5661	0.0019	78.42	87.13	17.60	0.31
7	930	3.0464	0.0033	68.36	89.58	18.21	0.82
8	1000	2.9475	0.0034	66.32	91.96	17.10	0.91
9	1100	2.6005	0.0013	85.25	96.59	19.38	0.52
10	1170	2.5650	0.0015	82.93	99.92	18.60	0.66
11	1400	27.2062	0.0837	9.62	100.00	23	31

注:下标m代表样品中测定的同位素比值;绢云母照射参数J=0.004872,绢云母样品量为36.25 mg。

表3 特提斯喜马拉雅金锑铅锌成矿带典型矿床成矿年龄

Table 3 ESR age of quartz in deposits of Tethys Himalaya Au-Sb-Pb-Zn metallogenic belt

矿床	测试矿物	方法	年龄/Ma	资料来源
查拉普金矿	石英	ESR	14.3~16.9	郑有业等,2007
马扎拉金锑矿	石英	ESR	21~24	①
壤拉锑矿	石英	ESR	18.6	
邦布金矿	石英	ESR	13.3	
得龙锑矿	石英	ESR	23.2	
沙拉岗锑矿	石英	ESR	18.8	
车穷卓布锑矿	石英	ESR	16.0~18.0	张建芳等,2010
哲古金锑矿	石英	ESR	17.6~18.4	
扎西康铅锌多金属矿	石英	ESR	18.3~23.3	
扎西康铅锌多金属矿	石英	ESR	15~25	孟祥金等,2008
查拉普金矿	伊利石	Ar-Ar	16.7	张刚阳,2012
扎西康铅锌多金属矿(后期)	绢云母	Ar-Ar	12.28	梁维等,2015
柯月铅锌多金属矿	绢云母	Ar-Ar	21.3	林彬等,2016a
扎西康铅锌多金属矿(后期)	绢云母	Ar-Ar	17.9	Sun et al., 2014
扎西康铅锌多金属矿(早期)	黄铁矿	Re-Os	43.1	Zhou et al., 2018
姐纳各普金矿	绢云母	Ar-Ar	17.6	董随亮等,2017
邦布金矿	绢云母	Ar-Ar	49.52	Pei et al.,2016
马攸木金矿	绢云母	Ar-Ar	59.34	江思宏等,2008
吉松铅锌矿	绢云母	Ar-Ar	16.64	本文

Ma,于俊杰等,2011)、洛扎地区淡色花岗岩(~17.7 Ma;黄春梅等,2013),错那淡色花岗岩(~17.7 Ma;王晓先等,2016),在形成时间上也与后碰撞阶段的金锑铅锌成矿作用相契合。

吉松铅锌矿紧邻错那洞岩淡色花岗岩(图1)。错那洞淡色花岗岩是扎西康矿集区内最大的侵入岩,已被识别为片麻岩穹隆构造(Fu et al., 2016;付建刚等,2018),它控制了扎西康铅锌多金属矿集区

内的矿床类型的产出及分布(李光明等,2017)。其开始活动时间为21 Ma(林彬等,2016b),在21~12 Ma(黄春梅等,未刊资料)均存在活动记录,与矿集区内已获得的成矿年龄一致,表明错那洞淡色花岗岩岩浆的发育及侵位为矿集区内金属矿床形成提供了驱动力。

已有研究证实了扎西康矿集区范围内的矿体与错那洞淡色花岗岩存在着成因联系(吴建阳等,

2015; Xie et al., 2015, 2017; 李光明等, 2017; 张志明等, 2017), 围绕错那洞淡色花岗岩内部及其接触带到岩体外围, 表现为 W、Sn、Bi 等高温元素→Pb、Zn、Ag、Sb 等中温元素→Au、Sb、Ag、Hg、As 等中低温元素异常组合(吴建阳等, 2015)。由此可以判定扎西康矿集内以吉松铅锌矿为代表的铅锌(金锑)矿与错那洞淡色花岗岩存在成因联系, 它们可能构成一个复杂的成矿系统。吉松矿石铅同位素特征与淡色花岗岩铅同位素几乎相同(Liang Wei et al., 2018), 也表明错那洞淡色花岗质岩浆活动为吉松铅锌矿提供了物质来源。

综上, 吉松铅锌矿成矿作用与错那洞淡色花岗岩关系密切, 后者可能为吉松铅锌矿提供了物质和热动力来源。

6 结 论

(1) 吉松铅锌矿绢云母 Ar-Ar 坪年龄为 $(16.64 \pm 0.30)\text{Ma}$, 等时线年龄为 $(16.61 \pm 0.30)\text{Ma}$, 表明吉松铅锌矿成矿作用发生时间是 17 Ma 左右, 形成于印—亚陆碰撞的后碰撞阶段。

(2) 藏南特提斯可能存在 3 期矿化事件, 分别为 59~49 Ma 金矿化事件、约 43 Ma 铅锌矿化事件及 21~12 Ma 铅锌金锑矿化事件。

(3) 错那洞淡色花岗岩的活动和侵位可能为吉松铅锌矿提供了物源和热驱动力。

致谢:衷心感谢中国地质科学院地质研究所氩实验室陈文研究员对实验测试提供的帮助。

注释

① 郑有业, 范文玉, 张晓保. 2003. 西藏江孜—隆子金、锑多金属成矿带资源调查评价地质报告, 1~98.

References

Burchfiel B C. 1992. The South Tibetan detachment system, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt[J]. The Geological Society of America Special Paper 269, 1~41.

Burg J, Guiraud M, Chen G, Li G C. 1984. Himalayan metamorphism and deformations in the North Himalayan Belt (southern Tibet, China) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 69(2): 391~400.

Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, Jin Guishan, Wang Qingli. 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).

Dong Suiliang, Huang Yong, Li Guangming, Zhang Linkui, Liang Wei, Qing Chengshi, Zhang Zhi, Li Hongliang, Li Yingxu, Cao Huawen. 2017. Geology and mineralization dating of Jienagepu Gold Deposit in Southern Tibet with Implication from Zhaxikang Pb-Zn-Au-Sb metallogenic system [J]. Resources & Industries, 19(5): 56~64(in Chinese with English abstract).

Fu Jiangang, Li Guangmin, Wang Genhou, Huang Yong, Zhang Linkui, Dong Suiliang, Liang Wei. 2017. First field identification of the Cuonadong dome in southern Tibet: Implications for EW extension of the North Himalayan gneiss dome [J]. International Journal of Earth Sciences, 106(5): 1581~1596.

Fu Jiangang, Li Guangming, Wang Genhou, Huang Yong, Zhang Linkui, Dong Suiliang, Liang Wei. 2018. Establishment of the North Himalayan double gneiss domes: Evidence from field identification of the Cuonadong dome, south Tibet[J]. Geology in China, 45(4): 783~802(in Chinese with English abstract).

Harrison T M, Copeland P, Kidd W, Yin A. 1992. Raising Tibet[J]. Science, 255(5052): 1663~1670.

Harrison T M, Lovera O M, Grove M. 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts[J]. Geology, 25(10): 899~902.

Hauck M, Nelson K, Brown L, Zhao W, Brown L D, Zhao W, Ross A R. 1998. Crustal structure of the Himalayan orogen at 90 east longitude from Project INDEPTH deep reflection profiles[J]. Tectonics, 17(4): 481~500.

Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, Wang Anjian, Pan Guitang, Qu Xiaoming, Nie Fengjun. 2006a. Metallogenesis in the collisional orogen of the the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. Geology in China, 33(2): 340~351(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, Mo Xuanxue, Ding Lin, Gao Yongfei, Dong Fangliu, Li Guangming, Qu Xiaoming, Zhao Zhidan, Jiang Sihong, Meng Xiangjin, Li Zhenqing, Qin Kezhang, Yang Zhiming. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. Mineral Deposits, 25(4): 337~359(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, Mo Xuanxue, Tian Shihong, Sun Xiaoming, Ding Lin, Wang Enquan, Gao Yongfeng, Xie Yuling, Zeng Lingsen, Qin Kezhang, Xu Jifeng, Qu Xiaoming, Yang Zhiming, Yang Zhusen, Fei Hongcai, Meng Xiangjin, Li Zhenqing. 2006c. 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, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, Meng Xiangjin, Li Zhenqing, Yang Zhiming, Zheng Mianping, Zheng Youye, Nie Fengjun, Gao Yongfei. 2006d. 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 Z Q, Zheng Y C, Zeng L S, Gao L E, Huang K X, Li W, Li Q Y, Fu Q, Liang W, Sun Q Z. 2012. Eocene–Oligocene granitoids in southern Tibet: Constraints on crustal anatexis and tectonic evolution of the Himalayan orogen[J]. Earth and Planetary Sciences Letters, 349:38–52.
- Hu Guyue, Zeng Lingsen, Qi Xuexiang, Hou Kejun, Gao Li' E. 2011. The Mid–Eocene subvolcanic field in the Lhunze–Qiaga area, Tethyan Himalaya, southern Tibet: A high–level magmatic suite related to the Yardio two–mica granite[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(11): 3308–3318(in Chinese with English abstract).
- Huang Chunmei, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Liu Dong, Huang Yu, Dong Mingchun, Hu Zhaochu, Zheng Jianping. 2013. Geochemistry, zircon U–Pb chronology and Hf isotope Luozha leucogranite, southern Tibet: Implication for petrogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11):3689–3702 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Liu Yifei, Bai Dapeng. 2008. Contrast of two–stage orogenic gold deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, (1): 174–175(in Chinese).
- Jiang S H, Nie F J, Hu P, Lai X R, Liu Y F. 2009. Mayum: An orogenic gold deposit in Tibet, China[J]. Ore Geology Reviews, 36: 160–173.
- Lee J, Hacker B, Wang Y. 2004. Evolution of North Himalayan gneiss domes: Structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet[J]. Journal of Structural Geology, 26(12): 2297–2316.
- Lee J, Hacker B R, Dinklage W S, Wang Yu, Gans P, Calvert A, Wang Jinglin, Chen Wenji, Blythe A E, McClelland W. 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints[J]. Tectonics, 19(5): 872–895.
- Li Guangming, Zhang Linkui, Jiao Yanjie, Xia Xiangbiao, Dong Suiliang, Fu Jiangang, Liang Wei, Zhang Zhi, Wu Jianyang, Dong Lei, Huang Yong. 2017. First Discovery and implications of Cuonadong superlarge Be–W–Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet[J]. Mineral Deposits, 36(4): 1003–1008(in Chinese with English abstract).
- Liang Wei, Hou Zengqian, Yang Zhusen, Li Zhenqing, Liu Yingchao, Li Qiuyun, Sun Qingzhong, Fu Qiang. 2014. Multiphase and polystage metallogenic process of the Zhaxikang large–size Pb–Zn–Ag–Sb polymetallic deposit in southern Tibet and its implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(1): 64–78 (in Chinese with English abstract).
- Liang W, Hou Z Q, Zheng Y C, Yang Z S, Li Z Q. 2018. The Zhaxikang Vein–type Pb–Zn–Ag–Sb deposit in Himalayan Orogen, Tibet: Product by overprinting and remobilization processes during post–collisional period [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 92(2):262–285.
- Liang Wei, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan. 2015. The Zhaxikang Pb–Zn polymetallic deposit: Ar–Ar age of sericite and its metallogenic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 89(3):560–568 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bin, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Wang Yiyun, Gao Yiming, Lin Xin, Yang Huanhuan, Leng Qiufeng, Li Xiaotong, Tang Xiaoqian, Fu Yangang. 2016a. A preliminary study of geological features and metallogenic epoch in Keyue Zn–polymetallic deposit, Tibet[J]. Mineral Deposits, 31(1):33–50(in Chinese with English abstract).
- Lin Bin, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Wang Yiyun, Meng Zhan, Tang Pan, Ding Shuai, Xu Yunfeng, Yuan Mei. 2016b. Geochemical characteristics, age and genesis of Cuonadong leucogranite, Tibet[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(3):391–406(in Chinese with English abstract).
- Liu Wenchao, Wang Yu, Zhang Xiangxin, Li Huimin, Zhou Zhiguang, and Zhao Xingguo. 2004. The rock types and isotope dating of the Kangmar gneissic dome in southern Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 11(4): 491–501(in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin, Yang Zhusen, Qi Xuexiang, Hou Zengqian, Li Zhenqing. 2008. Silicon–oxygen–hydrogen isotopic compositions of Zaxikang antimony polymetallic deposit in southern Tibet and its responses to the ore–controlling structure[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(7):1649–1655 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Hu Peng, Jiang Sihong, Li Zhenqing, Liu Yan, Zhou Yongzhang. 2005. Types and temporal–spatial distribution of gold and antimony deposit(prospects) in Southern Tibet, China[J]. Acta Geologica Sinica, 79(3): 373–385(in Chinese with English abstract).
- Pei Y R, Sun Q Z, Zheng Y C, Yang Z S, Li W, Huang K X. 2016. Genesis of the Bangbu orogenic gold deposit, Tibet: Evidence from fluid inclusion, stable isotopes, and Ar–Ar Geochronology [J]. Acta Geologica Sinica, 90(2): 722–737.
- Qi X X, Li T F, Meng X J, and Yu C L. 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Tethyan Himalayan foreland fault–fold belt in southern Tibet, and its constraint on antimony–gold polymetallic minerogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(7): 1638–1648.
- Sun X, Zheng Y Y, Pirajno F, McCuaig T C, Yu M, Xia S L, Song Q J, Chang H F. 2017. Geology, S–Pb isotopes, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Zhaxikang Sb–Pb–Zn–Ag deposit in Southern Tibet: Implications for multiple mineralization events at Zhaxikang [J]. Mineralium Deposita, 53(3), 435–458.
- Sun X, Zheng Y Y, Yu M. 2014. Preliminary Understanding of ore genesis of Zhaxikang Pb–Zn–Ag–Sb Deposit in the North Himalaya[J]. Acta Geologica Sinica, 88(supp.2): 199–201.

- Sun Xiaoming, Wei Huixiao, Zhai Wei, Shi Guiyong, Liang Yeheng, Mo Ruwei, Han Moxiang, Zhang Xiangguo. 2010. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6):1672–1684 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Yan Shuyu, Liu Jiang. 2016. Age and geochemistry of the Cuona leucogranite in southern Tibet and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(1):91–104.
- Wu Fuyuan, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang. 2015. Himalayan Leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and Plateau Uplift [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1):1–36(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianyang, Li Guangming, Zhou Qing, Dong Suiliang, Xia Xiangbiao, Li Yingxu. 2015. A preliminary study of the metallogenic system in the Zhaxikang integrated exploration area, southern Tibet[J]. *Geology in China*, 2015, 42(6): 1674–1683(in Chinese with English abstract).
- Xie Y L, Wang B G, Guo X, Wang L, Li G M, Li Y X. 2014. Fluid inclusion study of pegmatite in Zhaxikang Pb–Zn–Sb polymetallic deposit, Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(supp. 2): 1183–1185.
- Xie Y L, Li L M, Wang B G, Li G M, Liu H F, Li Y X, Dong S L, Zhou J J. 2017. Genesis of the Zhaxikang epithermal Pb–Zn–Sb deposit in southern Tibet, China: Evidence for a magmatic link [J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 891–909.
- Xie Y L, Wang B G, Li Y X, Li G M, Dong S L, Guo X, Wang L. 2015. Characteristics of pegmatite–Related fluids and significance to ore–forming processes in the Zhaxikang Pb–Zn–Sb polymetallic deposit, Tibet, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 811–821.
- Xu Peng, Tan Hongbing, Zhang Yanfei, Zhang Wenjie. 2018. Geochemical characteristics and source mechanism of geothermal water in Tethys Himalaya belt[J]. *Geology in China*, 45(6): 1142–1154(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhusen, Hou Zengqian, Gao Wei, Wang Haiping, Li Zhenqing, Meng Xiangjin, Qu Xiaoming. 2006. Metallogenic characteristics and genetic model of antimony and gold deposits in Southern Tibetan detachments system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1377–1391(in Chinese with English abstract).
- Yang Z S, Hou Z Q, Meng X J, Liu Y C, Fei H C, Tian S H, Li Z Q, Gao W. 2009. Post–collisional Sb and Au mineralization related to the south Tibetan detachment system, Himalayan orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1/3):194–212.
- Yin An, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211–280.
- Yin An. 2001. *Acta Geoscientia Sinica*, Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen in the context of phanerozoic continental growth of Asia[J]. *Earth–Science Reviews*, 22(3): 193–230(in Chinese with English abstract).
- Yin Yuan, Liang Wei, Xie Jincheng, Zhang Jijun. 2015. Fluid inclusions and its geological significance in the Jisong Pb–Zn deposit, southern Tibet[J]. *Geoscience*, 29(3): 553–563(in Chinese with English abstract).
- Yu Junjie, Zeng Lingsen, Liu Jing, Gao Li' E, Xie Kejia. 2011. Early Miocene leucogranites in Dinggye area, southern Tibet: Formation mechanism and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7):1961–1972 (in Chinese with English abstract).
- Yu Tao, Zhou Zhiguang, Liu Changfeng, Liang Dingyi. 2007. Metamorphic structural sequence of carboniferous and its underlying strata in Kangmar region of southern Tibet[J]. *Geoscience*, 21(3): 491–497 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen, Liu Jing, Gao Li' E, Xie Kejia, Wen Li. 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104–112 (in Chinese with English abstract).
- Zhai W, Sun X M, Zhou F, Mo R W, Wang C. 2014a. Helium and argon isotope systematics of orogenic gold, antimony deposits in the Himalayan Orogen, Southern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(supp. 2): 833–834.
- Zhai Wei, Sun Xiaoming, Yi Jianzhou, Zhang Xiangguo, Mo Ruwei, Zhou Feng, Wei Huixiao, Zeng Qinggao. 2014b. Geology, geochemistry, and genesis of orogenic gold–antimony mineralization in the Himalayan Orogen, south Tibet, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 58: 68–90.
- Zhang Gangyang, Zheng Youye, Zhang Jianfang, Zhang Shukun, Fan Zihui. 2011. Ore–control structural and geochronologic constrain in Shalagang antimony deposit in southern Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7):2143–2149 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Gangyang. 2012. Metallogenic Model and Prospecting Potential in Southern Tibet Au–Sb Polymetallic Belt[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 145–152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongrui, Hou Zengqian, Yang Zhiming. 2010. Metallogenesis and geodynamics of Tethyan metallogenic domain: A review[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 113–133(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianfang. 2010. The Genesis Study of Zhaxikang Lead Zinc Antimony Silver Deposit, North Himalaya[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 85 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jingyang, Liao Qun'an. 2005. Two leucogranite belts: Genesis and implication for Himalaya uplifting[J]. *Bulletin of Mineral, Petrology and Geochemistry*, 24(supp.): 85 (in Chinese).
- Zhang Jinjiang, Guo Lei, Zhang Bo. 2007. Structure and kinematics of

- the Yalashangbo dome in the northern Himalaya dome belt, China[J]. Chinese Journal of Geology, 42(1): 16–30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Yang Xiongying, Qi Guowei, Wang Dechao. 2011. Geochronology of the Malashan dome and its application in formation of the Southern Tibet detachment system (STDS) and Northern Himalayan gneiss domes(NHGD) [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(12):3535–3544(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhi, Zhang Linkui, Li Guangming, Liang Wei, Xia Xiangbiao, Fu Jiangang, Dong Suiliang, Ma Guotao. 2017. The Cuonadong Gneiss dome of north Himalaya: New number of Gneiss dome and a new proposition for the North Himalaya Gneiss Domes controlling the ore[J]. Acta Geoscientia Sinica, 38(5): 754–766(in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Zhao Yongxin, Wang Ping, Fan Wenyu, Chen Jing, Cao Xinzh, Zhang Xiaobao. 2004. Research on the metallogenic regularity progress in prospecting[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 29: 44–68(in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Duo Ji, Ma Guotao, Chen Jing, Dai Fanghua. 2007. Mineralization characteristics, discovery and age restriction of Chalapu Hardrock Gold Deposit, Southern Tibet [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 32(2): 185–193(in Chinese with English abstract).
- Zhou Q, Li W C, Qing C S, Lai Y, Li Y X, Liao Z W, Wu J Y, Wang S W, Dong L, Tian E Y. 2017. Origin and tectonic implications of the Zhaxikang Pb–Zn–Sb–Ag deposit in northern Himalaya: evidence from structures, Re–Os–Pb–S isotopes, and fluid inclusions [J]. Mineralium Deposita, 53(4):585–600.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰. 2006d. 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, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 东方浏, 李光明, 曲晓明, 赵志丹. 2006b. 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.
- 胡古月, 曾令森, 戚学祥, 侯可军, 高利娥. 2011. 藏南特提斯喜马拉雅带始新世隆子—恰嘎次火山岩区: 雅拉香波二云母花岗岩的高位岩浆体系[J]. 岩石学报, 27(11): 3308–3318.
- 黄春梅, 赵志丹, 朱弟成, 刘栋, 黄玉, 董铭淳, 胡兆初, 郑建平. 2013. 藏南洛扎地区淡色花岗岩锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素、地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 29(11):3689–3702.
- 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞, 白大鹏. 2008. 青藏高原两期造山型金矿床的对比研究[J]. 矿物学报, 1:174–175.
- 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 夏祥标, 董随亮, 付建刚, 梁维, 张志, 吴建阳, 董磊, 黄勇. 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义[J]. 矿床地质, 36(4): 1003–1008.
- 梁维, 杨竹森, 郑远川. 2015. 藏南扎西康铅锌多金属矿绢云母 Ar–Ar 年龄及其成矿意义[J]. 地质学报, 89(3):560–568.
- 梁维, 郑远川, 杨竹森, 李振清, 刘英超, 刘云飞, 李秋耘, 孙清钟, 付强. 2014. 藏南扎西康铅锌银锡多金属矿多期多阶段成矿特征及其指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 64–78.
- 林彬, 唐菊兴, 郑文宝, 王艺云, 高一鸣, 林鑫, 杨欢欢, 冷秋锋, 李骁童, 唐晓倩, 付燕刚. 2016a. 西藏柯月钨多金属矿床地质特征及成矿时代初步研究[J]. 矿床地质, 31(1):33–50.
- 林彬, 唐菊兴, 郑文宝, 冷秋锋, 林鑫, 王艺云, 孟展, 唐攀, 丁帅, 徐云峰, 袁梅. 2016b. 西藏错那洞淡色花岗岩地球化学特征、成岩时代及岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志, 35(3):391–406.
- 刘文灿, 王瑜, 张祥信, 李惠民, 周志广, 赵兴国. 2004. 西藏南部康马岩体岩石类型及其同位素测年[J]. 地学前缘, 11 (4): 491–501.
- 孟祥金, 杨竹森, 戚学祥, 侯增谦, 李振清. 2008. 藏南扎西康铍多金属矿硅–氧–氢同位素组成及其对成矿构造控制的响应[J]. 岩石学报, 24(7): 1649–1655.
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 李振清, 刘妍, 周永章. 2005. 藏南地区金和铍矿床(点)类型及其时空分布特征[J]. 地质学报, 79(3):373–385.
- 戚学祥, 李天福, 孟祥金, 于春林. 2008. 藏南特提斯喜马拉雅前陆断褶带新生代构造演化与铍金多金属成矿作用[J]. 岩石学报, 24 (7):1638–1648.
- 孙晓明, 韦慧晓, 翟伟, 石贵勇, 梁业恒, 莫儒伟, 韩墨香, 张相国. 2010. 藏南邦布大型造山型金矿成矿流体地球化学和成矿机制[J]. 岩石学报, 26(6):1672–1684.
- 王晓先, 张进江, 闫淑玉, 刘江. 2016. 藏南错那淡色花岗岩 LA–MC–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄、岩石地球化学及其地质意义[J]. 地质通报, 35(1):91–104.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 纪伟强. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 31(1):1–36.

附中文参考文献

- 陈文, 张彦, 张岳桥, 金贵善, 王清利. 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.
- 董随亮, 黄勇, 李光明, 张林奎, 梁维, 卿成实, 张志, 李洪梁, 李应棚, 曹华文. 2017. 藏南姐纳各普金矿地质特征及成矿时代约束——对扎西康矿集区铅锌金铍成矿系统的启示[J]. 资源与产业, 19 (5): 56–64.
- 付建刚, 李光明, 王根厚, 黄勇, 张林奎, 董随亮, 梁维. 2018. 北喜马拉雅双穹隆构造的建立: 来自藏南错那洞穹隆的厘定[J]. 中国地质, 45(4):783–802.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006a. 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, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲. 2006c. 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.

- 吴建阳, 李光明, 周清, 董随亮, 夏祥标, 李应栩. 2015. 藏南扎西康整装勘查区成矿体系初探[J]. 中国地质, 42(6): 1674-1683.
- 许鹏, 谭红兵, 张燕飞, 张文杰. 2018. 特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与物源机制[J]. 中国地质, 45(6): 1142-1154.
- 杨竹森, 侯增谦, 高伟, 王海平, 李振清, 孟祥金, 曲晓明. 2006. 藏南拆离系锡金成矿特征与成因模式[J]. 地质学报, 80(9): 1377-1391.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化—显生宙亚洲大陆生长[J]. 地球学报, 22(3): 193-230.
- 尹远, 梁维, 谢锦程, 张继军. 2015. 藏南吉松铅锌矿流体包裹体特征及其地质意义[J]. 现代地质, 29(3): 553-563.
- 于俊杰, 曾令森, 刘静, 高利娥, 谢克家. 2011. 藏南定结地区早中新世淡色花岗岩的形成机制及其构造动力学意义[J]. 岩石学报, 27(7): 1961-1972.
- 于涛, 周志广, 柳长峰, 梁定益. 2007. 藏南康马地区石炭系及其下伏变质构造地层序列[J]. 现代地质, 21(3): 491-497.
- 曾令森, 刘静, 高利娥, 谢克家, 文力. 2009. 藏南也拉香波穹隆早渐新世地壳深熔作用及其地质意义[J]. 科学通报, 54(3): 373-381.
- 张刚阳, 郑有业, 张建芳, 张苏坤, 樊子晖. 2011. 西藏沙拉岗锡矿控矿构造及成矿时代约束[J]. 岩石学报, 27(7): 2143-2149.
- 张刚阳. 2012. 藏南金锡多金属成矿带成矿作用与找矿前景研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 145-152.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明. 2010. 特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J]. 矿床地质, 29(1): 113-133.
- 张建芳. 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌银矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 85.
- 张金阳, 廖群安. 2005. 藏南两条淡色花岗岩带: 成因及对喜马拉雅山隆升的意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(增刊): 134.
- 张进江, 郭磊, 张波. 2007. 北喜马拉雅穹隆带雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征[J]. 地质科学, 42(1): 16-30.
- 张进江, 杨雄英, 戚国伟, 王德朝. 2011. 马拉山穹隆的活动时限及其在藏南拆离系—北喜马拉雅片麻岩穹隆形成机制的应用[J]. 岩石学报, 27(12): 3535-3544.
- 张志, 张林奎, 李光明, 梁维, 夏祥标, 付建刚, 董随亮, 马国桃. 2017. 北喜马拉雅错那洞穹隆: 片麻岩穹隆新成员与穹隆控矿新命题. 地球学报, 38(5): 754-766.
- 郑有业, 多吉, 马国桃, 陈静, 代芳华. 2007. 藏南查拉普岩金矿床特征、发现及时代约束[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 185-193.
- 郑有业, 赵永鑫, 王苹, 范文玉, 陈静, 曹新志, 张晓保. 2004. 藏南金锡成矿带成矿规律研究及找矿取得重大进展[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1): 44-68.