

文章编号: 0258-7106(2014)01-0123-14

云南保山金厂河铁铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线测年及其地质意义*

黄 华¹, 张长青², 周云满³, 谢华锋⁴, 刘 博¹, 谢永富³,
董云涛³, 杨春海³, 董文伟³

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南 昆明 650224; 4 中国地质大学能源学院, 北京 100083)

摘 要 金厂河铁铜铅锌多金属矿床位于保山地块北部, NS 向保山-施甸复背斜与 NNW 向澜沧江断裂锐角交汇部位的南部。矿体呈层状、似层状产于寒武系核桃坪组金厂河背斜的层间裂隙中, 受 NW 向、NE 向断裂交汇处的控制。选取闪锌矿及其共生的方铅矿、黄铜矿、石英样品, 应用 Rb-Sr 同位素测年方法, 获得闪锌矿等时线年龄为 $(118.9 \pm 5.9) \text{ Ma}$, 闪锌矿 + 方铅矿等时线年龄为 $(119.3 \pm 1.7) \text{ Ma}$, 闪锌矿 + 黄铜矿等时线年龄为 $(120.3 \pm 5.1) \text{ Ma}$, 闪锌矿 + 石英等时线年龄为 $(117.0 \pm 2.4) \text{ Ma}$, 闪锌矿 + 方铅矿 + 石英等时线年龄为 $(118.7 \pm 1.5) \text{ Ma}$, 闪锌矿 + 方铅矿 + 黄铜矿等时线年龄为 $(119.6 \pm 1.6) \text{ Ma}$, 闪锌矿 + 方铅矿 + 黄铜矿 + 石英等时线年龄为 $(118.9 \pm 1.4) \text{ Ma}$ 。Rb-Sr 定年结果表明, 金厂河铁铜铅锌多金属矿床的成矿时代为 117~120 Ma, 为早白垩世。热液矿物组合的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 平均值为 0.713 885, 与保山地块内志本山岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值接近, 指示其成矿物质主要来源于地壳, 成矿作用与保山地块内燕山晚期花岗岩岩浆活动有关。结合矿区重力负异常特点, 推测矿区内存在隐伏的中-酸性岩体。通过地球动力学背景探讨, 认为该矿床的形成可能是对中特提斯洋闭合过程中腾冲地块与保山地块碰撞造山作用的响应, 与地块内部受碰撞影响而导致地壳深熔所产生的岩浆作用有关。

关键词 地球化学; 闪锌矿; 共生矿物; Rb-Sr 定年; 成矿时代; 金厂河铁铜铅锌矿床; 云南

中图分类号: P618.31; P618.41

文献标志码: A

Rb-Sr isochron age of Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Yunnan Province and its geological significance

HUANG Hua¹, ZHANG ChangQing², ZHOU YunMan³, XIE HuaFeng⁴, LIU Bo¹,
XIE YongFu³, DONG YunTao³, YANG ChunHai³ and DONG WenWei³

(1 Faculty of Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Yunnan Gold Mining Industry Group, Kunming 650224, Yunnan, China; 4 College of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit is a concealed mineral deposit located in the northern part of the Baoshan massif and lying at the intersection between the Baoshan-Shidian anticlinorium and the Lancang River fracture. The ore bodies occur in the interlayer fissures of Jinchanghe anticline in Cambrian Hetaoping

* 本文得到公益性科研项目(K0904, 200911007)、国家自然科学基金项目(40902029)和云金集团项目“滇西地区金多金属矿成矿规律及成矿系列研究”的联合资助

第一作者简介 黄 华, 女, 1989 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: huanghuallsd@163.com

收稿日期 2013-12-18; 改回日期 2013-12-30。许德焕编辑。

Formation and are controlled by the NW-trending faults and NE-striking faults. The Rb-Sr isotopic dating was carried out for sphalerite and its associated minerals (pyrite, galena, chalcopyrite and quartz) from the Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit. In addition to sphalerite age of (118.9 ± 5.9) Ma and sphalerite + galena assemblage age of (119.3 ± 1.7) Ma, the authors also obtained sphalerite + chalcopyrite assemblage age of (120.3 ± 5.1) Ma, sphalerite + quartz age of (117.0 ± 2.4) Ma, sphalerite + galena + quartz assemblage age of (118.7 ± 1.5) Ma, sphalerite + galena + chalcopyrite assemblage age of (119.6 ± 1.6) Ma and sphalerite + galena + chalcopyrite + quartz assemblage age of (118.9 ± 1.4) Ma by the same means. The results of Rb-Sr isotopic dating show that the metallogenic epoch is about 117 ~ 120 Ma and the Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit was formed in Early Cretaceous. The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of hydrothermal mineral assemblage is equal to 0.713 885 and closed to the $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of Zhibenshan granite. Based on these data, the authors consider that the ore-forming materials of the ore bodies in the Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit were derived from the crust and the mineralization was related to the local silicic magmatism in Late-Yanshanian period. It can be inferred that there exist concealed intermediate-acid intrusive rocks, as evidenced by the negative gravitational anomaly in the mining area. A study of the geodynamical setting indicates that the formation of the deposit was the response to the collision orogenesis of Tengchong block and Baoshan block during the closure of the Meso-Tethys period, and was related to the crustal anatexis in Baoshan block affected by the collision.

Key words: geochemistry, sphalerite, mineral assemblage, Rb-Sr isochron age, metallogenic epoch, Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Yunnan Province

金厂河铁铜铅锌多金属矿床位于三江地区保山地块的北部。该地块内主要发育铁、铜、铅锌、银、汞、锡、稀有金属等热液矿床,其中,赋存在早古生界碳酸盐岩中的热液铅锌(铜)矿是最重要的矿床类型,典型矿床有保山核桃坪、镇康芦子园、龙陵勐糯铅锌矿等(陶琰等,2010)。

1990~2003年,云南省地质矿产局、云南省地质调查院等先后在金厂河矿区开展了地面磁测、重力测量、土壤化探测量,并以钻探验证了隐伏铁铜铅锌矿体的存在。自2004年至今,云南黄金矿业集团股份有限公司对金厂河矿床进行了普查与详查,其铜、铅锌、铁的储量均已达中-大型规模。然而,迄今该矿床的研究程度还相对较低,前人仅对其矿床地质特征和垂直分带特征进行了初步研究(符德贵等,2004;周荣等,2008;张恩才等,2010),并报道了2件方铅矿样品的铅同位素模式年龄,为428.5 Ma(周荣等,2008),但由于方铅矿中的铅多为普通铅,Th、U含量极少(韩发,2006),且利用Pb-Pb法测定的模式年龄具有多解性(刘建明等,1998),因此,金厂河矿床目前仍缺少精确的成矿年龄。

成矿时代的精确厘定对探讨矿床成因及成矿构造地质背景等具有重要意义。直接测定矿石矿物的同位素年龄是确定热液矿床成矿时代最有效的方法

(如锡石 U-Pb 法,Yuan et al.,2008;2011;袁顺达等,2010;闪锌矿 Rb-Sr 法,张长青等,2008;胡乔青等,2012)。近年来,辉钼矿 Re-Os 同位素测年方法的精度较高,已被广泛应用于各类金属矿床成矿年代学的研究(Stein et al.,1997;Mao et al.,2003;2006;2008;袁顺达等,2012)。铅锌矿床的定年一直是国内外地学界研究的难题,即便是全球研究程度最高的 MVT 矿床也是如此(Nakai et al.,1990;1993;Sangster,1996),但仍有许多学者对铅锌矿的成矿年代学进行了持续而深入的研究,并先后发表了大量有关闪锌矿 Rb-Sr 定年(Nakai et al.,1990;1993;Brannon et al.,1992a;1992b;Christensen et al.,1993;1995a;1995b;Pettke et al.,1996;李华芹,1998;黄智龙等,2004;张长青等,2008;胡乔青等,2012)以及闪锌矿流体包裹体 Rb-Sr 定年(Nakai et al.,1990;Pettke et al.,1996)等方面的研究成果。

本文以金厂河矿床详细的矿床地质特征研究为基础,选取其主成矿阶段的闪锌矿及与之共生的方铅矿、黄铜矿、石英等热液矿物组合进行了 Rb-Sr 同位素测年,以期获得精确的 Rb-Sr 等时线年龄,并选取多种矿物组合进行测年以相互印证,旨在为厘定成矿时代、探索成矿机制提供可靠依据。

1 区域地质背景

金厂河矿床位于三江地区保山地块的北部，其区域大地构造位置处于冈底斯-念青唐古拉褶皱系的南段(云南黄金矿业集团股份有限公司, 2010)、印度板块与亚欧板块主碰撞带南东侧的“三江”地区“蜂腰”弧形构造南侧散开端的近根部(薛传东等, 2008)、NS 向保山-施甸复背斜与 NNW 向澜沧江断裂锐角交汇部位的南部(图 1)。保山地块西侧以高黎贡-怒江断裂与腾冲-瑞丽地块相邻，东侧以澜沧江断裂及崇山变质群与兰坪-思茅盆地相接(图 1)，北

侧在碧江一带由于澜沧江断裂与怒江断裂汇拢而消失，南部延伸出国境，构成滇缅泰马(Sibumasu)地体的一部分(陶琰等, 2010)。

保山地块内发育有古生界、中生界和新生界。其中，下古生界出露范围最广，发育最完全，主要是一套浅海-半深海相沉积建造，岩性为碎屑岩、碳酸盐岩、硅质岩、页岩等(邓必方, 1995; 陶琰等, 2010)，由于受区域变质作用的影响，碳酸盐岩和碎屑岩大多发生变质作用，形成大理岩、大理岩化灰岩以及钙质、粉砂质板岩(薛传东等, 2008)。寒武系沙河厂组、核桃坪组和保山组碳酸盐岩及奥陶系是该区重要的赋矿层位(李文桦等, 1985; 夏庆霖等, 2005; 朱

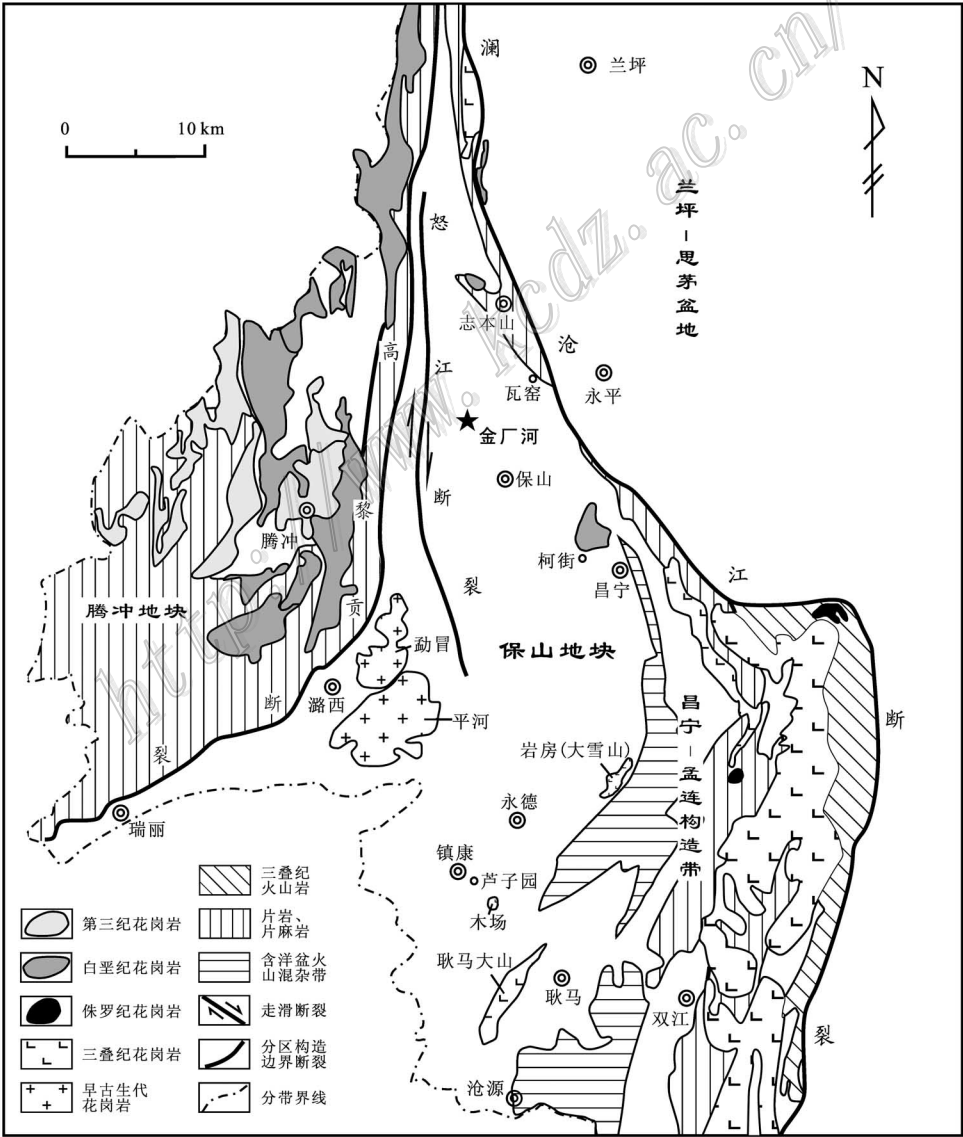


图 1 保山地块及邻区构造与岩浆岩分布略图(据陶琰等, 2010 修改)

Fig. 1 Tectonics and granitoid plutons in Baoshan block and adjacent area (modified after Tao et al., 2010)

余银等, 2006; 杨玉龙等, 2012)。

区域内褶皱、断裂构造发育, 主要表现为 NNW 向紧密排列的同向断裂, 晚期被 NW 向及 NE 向断裂错断。褶皱主要包括北部的保山-施甸复式背斜、中部的勐兴背斜、南部的镇康复式背斜等。在该地区, 断裂和褶皱组合控矿十分明显, 尤其是在断裂与褶皱的交汇处常形成大-中型铅锌(铜)热液矿床(杨玉龙等, 2012)。

如图 1 所示, 早古生代花岗岩主要出露于保山地块的南部, 形成于统一的冈瓦纳大陆时期, 年龄范围大致为 500~470 Ma (Chen et al., 2007; Liu et al., 2009; 陶琰等, 2010), 包括龙陵-潞西地区的平河花岗岩(486~480 Ma, 董美玲等, 2012)、勐冒花岗岩(454.7 ± 1.5) Ma (熊昌利等, 2012), 三叠纪形成的花岗岩体有木场、岩房(大雪山)、耿马大山等岩体(陶琰等, 2010), 白垩纪形成的花岗岩体包括志本山(126.7 ± 1.6) Ma (柯街 93 ± 1.3) Ma 等岩体。

2 矿床地质特征

金厂河矿床位于保山市北部的瓦窑镇, 地理坐标: 东经 $99^{\circ}10'12'' \sim 99^{\circ}11'31''$ 、北纬 $25^{\circ}23'46'' \sim 25^{\circ}24'51''$, 地处近 NS 向的木瓜树-朱石箐断裂与木瓜树-阿石寨断裂夹持区内 NE 向与 NW 向构造交汇处的西部边界。该矿区内出露的地层有寒武系、奥陶系、志留系及第四系(图 2), 寒武系核桃坪组中段大理岩化灰岩及泥质灰岩是该矿区主要的赋矿围岩(图 3)。

该矿床位于 NS 向保山-施甸复背斜内茅竹棚-核桃坪次级复背斜的倾伏端。矿区内的主要褶皱为 NE 向金厂河背斜, 断裂主要有 NW 向、NE 向、近 NS 向 3 组, 与区域构造线的方向基本一致。其中, F2 为逆断层, NW 走向, 倾向 SW, 倾角 74° ; F10 为正断层, NE 走向, 倾向 SE, 倾角 70° (图 2)。F2 和 F10 断裂是该矿区内主要的控矿构造, 矿体明显受其控制。金厂河背斜的褶皱轴面是应力较为集中的部位, 岩层易产生张性裂隙而成为有利的容矿构造。

矿区地表可见海西期的辉绿岩-辉长岩呈岩脉、岩株状产出(云南黄金矿业集团股份有限公司, 2010), 分布点较多, 呈岛状-透镜状展布(图 2), 出露面积为 $0.11 \sim 0.39 \text{ km}^2$; 也有少量辉绿岩-辉长岩沿构造破碎带、层间裂隙呈脉状-透镜状分布。

该矿区内, 矿化带沿走向长约 1000 m, 沿倾向宽约 1500 m。铁铜铅锌矿体位于地表以下 261.2~732.1 m, 平均 370 m, 均为隐伏矿体, 总体走向为 NE 向, 总体倾向为向东缓倾。矿体呈层状、似层状、透镜状产于矽卡岩和矽卡岩化大理岩中, 在金厂河背斜核部矿化较强, 厚度较大, 向四周矿化减弱, 厚度逐渐减小(图 3)。目前, 该矿区内共圈定出 174 个矿体, 其中, 铅锌矿体 43 个、铜矿体 57 个、磁铁矿体 65 个; $w(\text{Pb})$ 平均 0.68%, 最高 7.07%; $w(\text{Zn})$ 平均 3.19%, 最高 11.68%; $w(\text{Cu})$ 平均 0.12%, 最高 6.88%; $w(\text{Fe})$ 平均 35.02%, 最高 51.75%。

金厂河矿床的矿石类型包括矽卡岩型磁铁矿石、矽卡岩型铜铅锌矿石(图 4A、B)以及石英脉型铜铅锌矿石(图 4C、D)。矽卡岩型磁铁矿石中的磁铁矿为铁黑色, 半金属光泽, 半自形-他形中细粒结构, 呈浸染状与阳起石脉共生充填于黑柱石粒间。在矽卡岩型铜铅锌矿石中, 共生的硫化物组合有闪锌矿-方铅矿、闪锌矿-黄铜矿、闪锌矿-方铅矿-黄铜矿, 矿石结构有浸蚀结构、他形-半自形粒状结构, 矿石构造有块状、浸染状、条带状构造。矿石矿物交代阳起石、黑柱石、石榴子石等矽卡岩矿物。石英脉型铜铅锌矿石中, 共生硫化物的颜色、结构与矽卡岩型铜铅锌矿石的相同, 呈浸染状或脉状沿石英脉或方解石脉交代阳起石、黑柱石等矽卡岩矿物。矽卡岩型磁铁矿石分布于矿体的下部, 形成较早, 与退化蚀变矿物共生; 矽卡岩型及石英脉型铜铅锌矿石分布于矿体的中-上部, 形成较晚, 矿石矿物充填交代矽卡岩及退化蚀变矿物。

矿区内主要的围岩蚀变有矽卡岩化、黄铁矿化、磁铁矿化、绿泥石化、硅化、大理岩化、方解石化等。其中, 矽卡岩化最为发育, 显示出该区的铁铜铅锌多金属矿化可能与隐伏的中-酸性岩体有关, 但目前矿区内尚未发现中-酸性岩体, 不过物探资料显示出该矿区为区域重力负异常区(符德贵等, 2004), 故推测其深部可能存在隐伏的中-酸性岩体。根据矽卡岩矿物组合, 可将矿区内的矽卡岩分为阳起石矽卡岩、石榴子石阳起石矽卡岩、阳起石黑柱石矽卡岩、绿帘石矽卡岩等。金厂河矿床从深部至浅部存在垂向分带, 自两断裂的交汇处向西存在水平分带, 两者具有一定的相似性: 含 Fe 钙质矽卡岩 $\rightarrow$ 含 Cu-Pb-Zn 钙质矽卡岩 $\rightarrow$ 含 Pb-Zn-Cu 锰质矽卡岩 $\rightarrow$ 大理岩化灰岩。

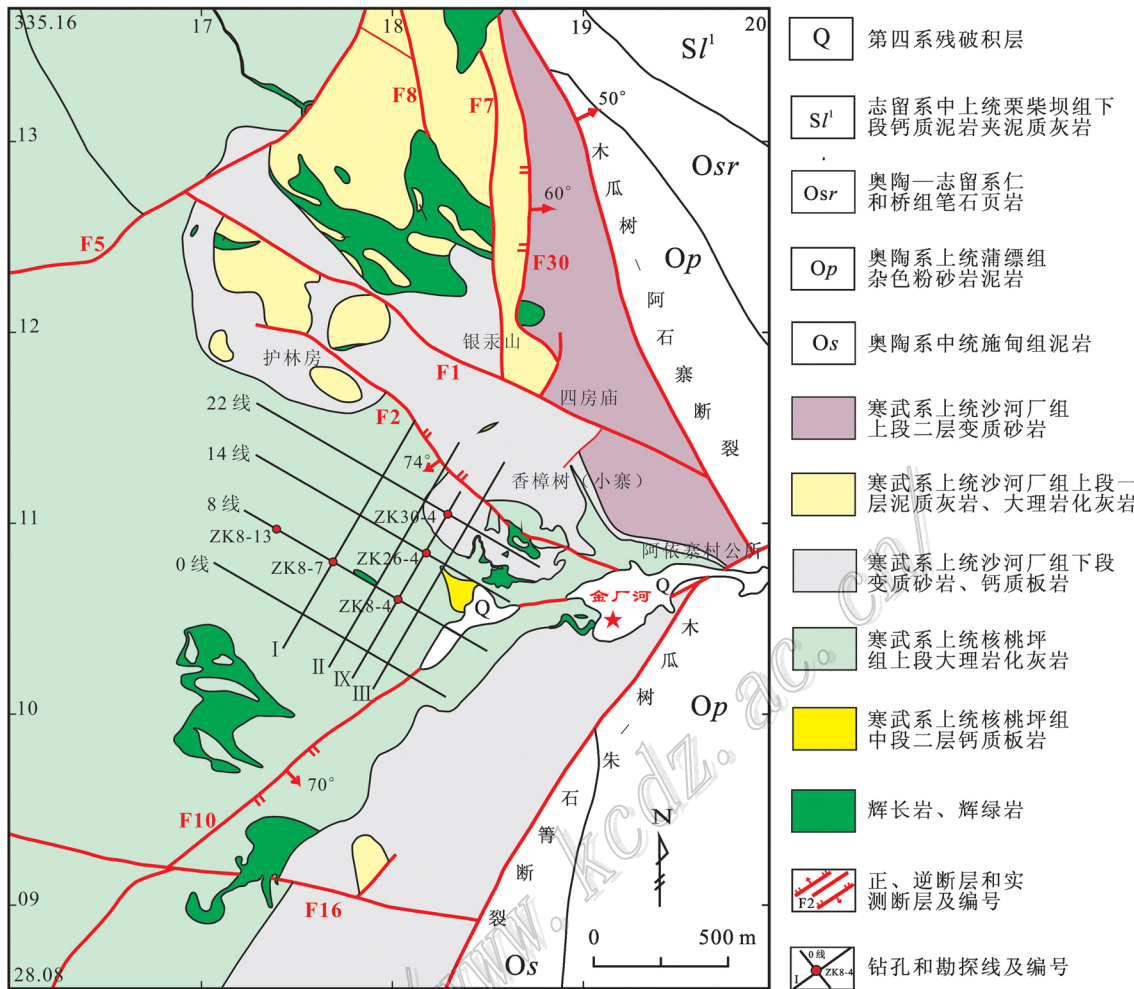


图 2 金厂河矿区地质略图(据云南黄金矿业集团股份有限公司, 2010 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Jingchanghe deposit (modified after Yunnan Gold Mining Industry Group, 2010)

3 样品及测试方法

本次用于 Rb-Sr 同位素测年的共生硫化物和石英样品均采自金厂河矿区 1810 中段 ZnV3 矿体(表 1),为石英-硫化物阶段的块状、条带状矿石及共生石英。测试样品包括闪锌矿单矿物,共生矿物组合有:闪锌矿-方铅矿,闪锌矿-黄铜矿,闪锌矿-石英,闪锌矿-方铅矿-黄铜矿,闪锌矿-方铅矿-石英(图 4)。镜下观察可见:闪锌矿呈棕红色、棕褐色,方铅矿为铅灰色,黄铜矿为铜黄色,矿石结构有他形-半自形粒状结构、交代溶蚀结构,构造有块状、浸染状构造(图 4)。闪锌矿常与方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿共生,沿石英脉、方解石脉分布,或分布于退化蚀变阶段的阳起石及少量黑柱石中(图 4)。

首先,将样品粉碎、过筛,至 40~60 目,然后,在双目镜下挑选出纯净的硫化物及石英,使其纯度达 99% 以上,供分析用。

Rb-Sr 同位素测试方法步骤如下:① 处理:对挑纯的单矿物样品经超声波清洗,然后研磨至 200 目以上;② 熔样:称取单矿物样品 0.2~0.3 g,用 Teflon 高压密闭熔样方法熔样;③ 加入稀释剂:用稀盐酸溶解,并适当加入少量稀硝酸,将该溶液分为 2 份,在其中 1/3 溶液里加入铷锶混合稀释剂,用于样品定量测定,另一份溶液用于比值测定;④ Rb、Sr 化学分离:将上述溶液离心分离,取其清液上柱进行总离子交换柱分离。用 20 ml 的 1.5 mol/L 盐酸预平衡交换柱,用 3.5 ml 的 2.5 mol/L 盐酸溶解样品,并用石英吸管吸入交换柱内,用 28 ml 的 1.5 mol/L 盐酸洗提 Rb,蒸干,供质谱测定,用 13 ml 的 2.5 mol/L

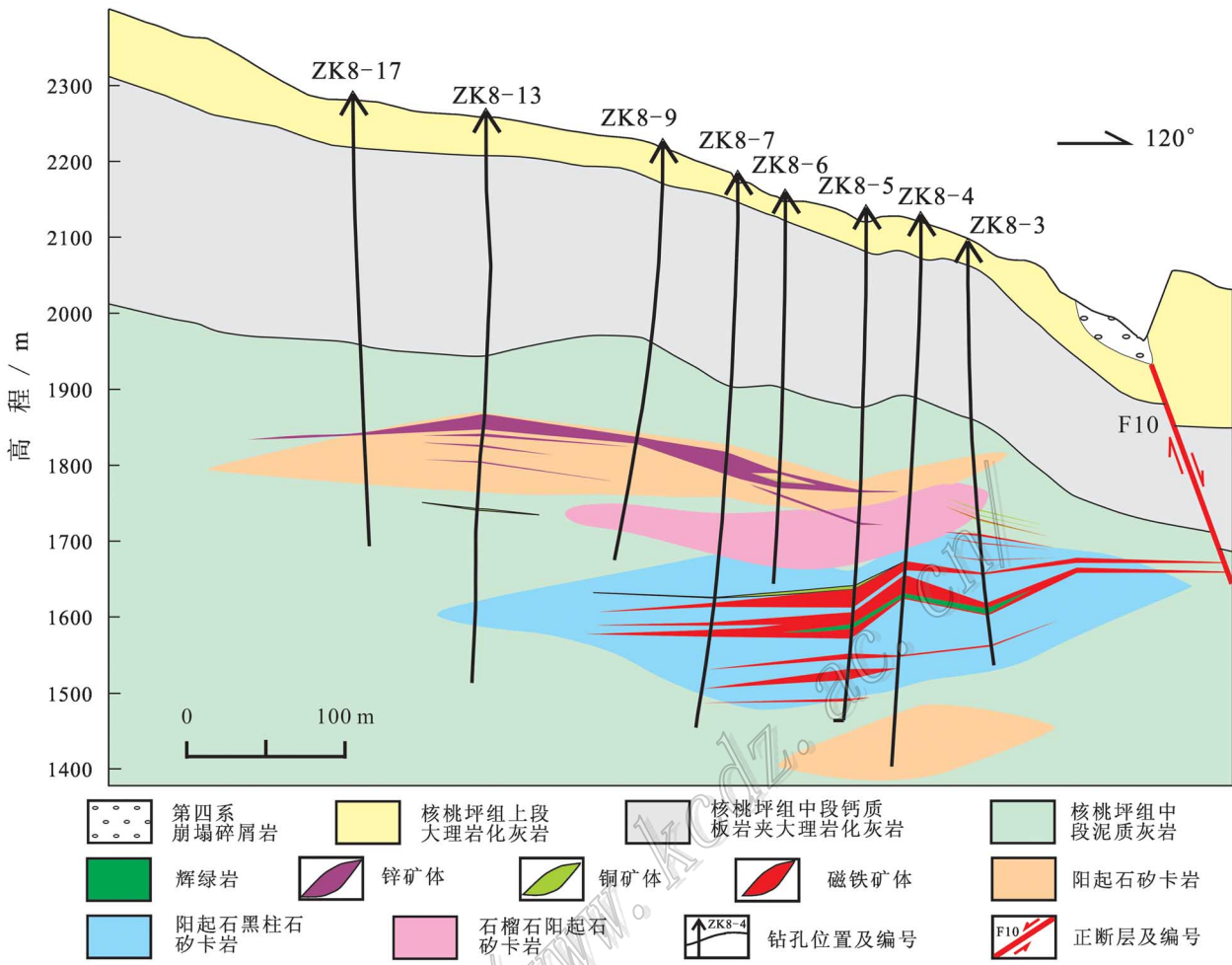


图 3 金厂河矿区 8 号勘探线地质剖面图(据云南黄金矿业集团股份有限公司,2010 修改)
Fig. 3 Geological cross section along No.8 exploration line of the Jinchanghe deposit
(modified after Yunnan Gold Mining Industry Group, 2010)

盐酸洗提、丢弃,用 12 ml 的 2.5 mol/L 盐酸洗提 Sr, 蒸干,供质谱测定(王银喜等,1988)。

本文样品的 Rb-Sr 同位素分析在南京大学现代分析中心同位素分析室完成。测试仪器为英国制造的 VG354 多接收质谱计。实验测定的美国 NBS9 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素标准为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710\,236 \pm 0.000\,007$, 标准化值采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$, Sr 全流程本底为 $(5 \sim 7) \times 10^{-9} \text{ g}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}} = 0.7045$, $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}} = 0.0827$ (Jacobsen et al., 1984; 王银喜等,2005)。年龄计算采用国际通用的 ISOPLOT 程序,在等时线年龄计算中, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差采用 1%, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值误差采用 0.05%, 置信度 95%, $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。

4 测试结果

本次测试样品共 15 件,其中,闪锌矿 8 件,方铅矿 2 件,黄铜矿 3 件,石英 2 件。表 2 所列数据是质谱计测量结果经过本底和稀释剂叠加扣除后所得的计算值。金厂河矿区热液矿物的 $w(\text{Rb})$ 较低,为 $0.0196 \times 10^{-6} \sim 1.594 \times 10^{-6}$, $w(\text{Sr})$ 也较低,为 $0.0713 \times 10^{-6} \sim 3.249 \times 10^{-6}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较小,为 $0.713\,929 \sim 0.727\,204$, 平均为 $0.717\,762$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较大,为 $0.1193 \sim 7.897$, 平均为 2.3120 。本文利用不同的矿物共生组合相互制约,得到闪锌矿单矿物及其共生组合共 7 条 Rb-Sr 等时线,均表现出很好的线性关系(图 5)。

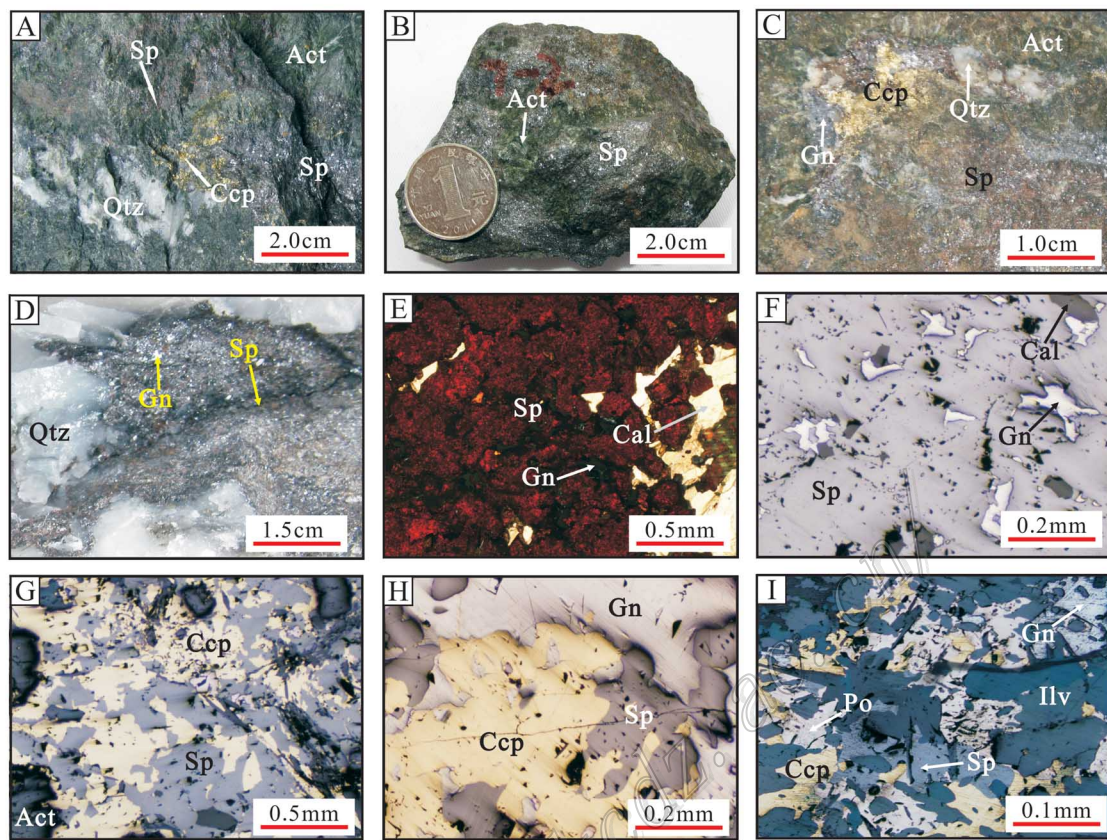


图 4 金厂河铁铜铅锌多金属矿床硫化物矿石样品特征

A. 块状矿石, 闪锌矿、黄铜矿交代阳起石; B. 团块状闪锌矿交代阳起石; C. 块状矿石, 闪锌矿、方铅矿、黄铜矿与石英交代阳起石; D. 块状矿石, 石英脉中闪锌矿与方铅矿共生; E. 棕红色闪锌矿与方解石共生, 均呈他形粒状结构(单偏光); F. 方解石脉中的方铅矿与闪锌矿共生(反射光); G. 黄铜矿与闪锌矿交代阳起石(反射光); H. 闪锌矿、方铅矿、黄铜矿共生, 均呈交代溶蚀结构(反射光); I. 闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿交代黑柱石, 呈交代溶蚀结构(反射光)

Sp—闪锌矿; Ccp—黄铜矿; Act—阳起石; Gn—方铅矿; Qtz—石英; Cal—方解石; Po—磁黄铁矿; Ilv—黑柱石

Fig. 4 Characteristics of the sulfide ore samples from the Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

A. Massive ore, sphalerite and chalcopyrite replacing actinolite; B. Massive sphalerite replacing actinolite; C. Massive ore, sphalerite, galena, chalcopyrite and quartz replacing actinolite; D. Massive ore, sphalerite associated with galena in the quartz vein; E. Brownish red sphalerite associated with calcite and assuming anhedral granular texture (under transmitted light); F. Galena associated with sphalerite in the calcite vein (under reflective light); G. Chalcopyrite and sphalerite replacing actinolite (under reflective light); H. Sphalerite and galena associated with chalcopyrite and assuming metasomatic dissolution texture (under transmitted light); I. Sphalerite, galena, chalcopyrite and pyrrhotite replacing ilvaite and assuming metasomatic dissolution structure (under transmitted light)

Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Act—Actinolite; Gn—Galena; Qtz—Quartz; Cal—Calcite; Po—Pyrrhotite; Ilv—Ilvaite

应用 ISOPLOT 软件计算得到: 闪锌矿单矿物的 Rb-Sr 等时线年龄为 (118.9 ± 5.9) Ma, 初始铷同位素组成 $I_{Sr} = 0.71388$, MSWD = 1.4 (图 5a); 共生矿物组合闪锌矿与方铅矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 (119.3 ± 1.7) Ma, 初始铷同位素组成 $I_{Sr} = 0.713878$, MSWD = 1.19 (图 5b); 共生矿物组合闪锌矿与黄铜矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 (120.3 ± 5.1) Ma, 初始铷同位素组成 $I_{Sr} = 0.713846$, MSWD = 1.4 (图 5c); 共生矿物组合闪锌矿与石英的 Rb-Sr 等时线年龄为

(117.0 ± 2.4) Ma, 初始铷同位素组成 $I_{Sr} = 0.713907$, MSWD = 1.15 (图 5d); 共生矿物组合闪锌矿、方铅矿和石英的 Rb-Sr 等时线年龄为 (118.7 ± 1.5) Ma, 初始铷同位素组成 $I_{Sr} = 0.713877$, MSWD = 1.3 (图 5e); 共生矿物组合闪锌矿、方铅矿和黄铜矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 (119.6 ± 1.6) Ma, 初始铷同位素组成 $I_{Sr} = 0.713855$, MSWD = 1.2 (图 5f); 共生矿物组合闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和石英的 Rb-Sr 等时线年龄为 (118.9 ± 1.4) Ma, 初始铷

表 1 金厂河矿床 Rb-Sr 同位素测年样品取样位置及样品特征

Table 1 Locations and characteristics of samples from the Jinchanghe deposit for Rb-Sr isotopic dating

编号	取样位置	样品描述
JCH-1	1810 中段 ,穿脉 8-2 ZnV3 矿体西侧层状矿石	共生的闪锌矿、方铅矿、黄铜矿交代阳起石
JCH-2	1810 中段 ,穿脉 8-2 ZnV3 矿体西侧层状矿石	闪锌矿交代黑柱石和阳起石
JCH-3	1810 中段 ,穿脉 8-2 ZnV3 矿体西侧铅锌矿脉	闪锌矿、方铅矿共生产于石英脉中
JCH-4	1810 中段 ,穿脉 8-2 ZnV3 矿体西侧层状矿石	块状闪锌矿交代阳起石
JCH-5	1810 中段 ,穿脉 8-2 ZnV3 矿体中部层状矿石	共生的闪锌矿、方铅矿、黄铜矿交代阳起石
JCH-6	1810 中段 ,穿脉 8-2 ZnV3 矿体中部铅锌矿脉	闪锌矿、方铅矿共生产于石英脉中
JCH-7	1810 中段 ,沿脉 5 ZnV3 矿体中部层状矿石	块状闪锌矿交代石榴子石和阳起石
JCH-8	1810 中段 ,沿脉 5 ZnV3 矿体中部层状矿石	共生的闪锌矿、方铅矿、黄铜矿交代阳起石

表 2 金厂河矿床闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和石英的 Rb-Sr 同位素组成

Table 2 Rb-Sr isotopic analyses of sphalerite , galena , chalcopyrite and quartz from the Jinchanghe deposit

样号	矿物	$\alpha(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	$\alpha(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\lambda}$	$1/\text{Rb}/10^{-6}$	$1/\text{Sr}/10^{-6}$
JCH-1	闪锌矿	0.1103	0.1129	2.883	0.718842 ± 7	0.714007	9.066183137	8.857395926
JCH-2	闪锌矿	0.0857	0.4238	0.5967	0.714749 ± 10	0.713748	11.66861144	2.359603587
JCH-3	闪锌矿	0.0548	0.3507	0.4608	0.714744 ± 9	0.713971	18.24817518	2.851439977
JCH-4	闪锌矿	0.0196	0.3205	0.1804	0.714261 ± 11	0.713958	51.02040816	3.120124805
JCH-5	闪锌矿	0.0695	0.1029	1.991	0.717105 ± 10	0.713766	14.38848921	9.718172983
JCH-6	闪锌矿	0.5327	1.492	1.053	0.715747 ± 9	0.713981	1.87722921	0.670241287
JCH-7	闪锌矿	0.1405	0.4326	0.9585	0.715579 ± 12	0.713972	7.117437722	2.311604253
JCH-8	闪锌矿	0.4248	1.547	0.8104	0.715128 ± 9	0.713769	2.354048964	0.646412411
JCH-5	方铅矿	0.1681	0.0713	6.961	0.725753 ± 9	0.714079	5.948839976	14.02524544
JCH-8	方铅矿	0.2153	0.0804	7.897	0.727204 ± 8	0.713961	4.644681839	12.43781095
JCH-1	黄铜矿	0.2058	3.249	0.1869	0.714275 ± 8	0.713962	4.859086492	0.307787011
JCH-5	黄铜矿	0.0782	0.9325	0.2475	0.714166 ± 12	0.713751	12.78772379	1.072386059
JCH-8	黄铜矿	0.0617	1.528	0.1193	0.713929 ± 11	0.713729	16.20745543	0.654450262
JCH-3	石英	1.594	0.8113	5.798	0.723543 ± 8	0.71382	0.627352572	1.232589671
JCH-6	石英	1.401	0.9109	4.536	0.721410 ± 8	0.713803	0.713775874	1.097815347

同位素组成 $I_{\text{Sr}}=0.713\ 854$,MSWD=1.3(图 5g)。

5 讨 论

5.1 年龄可靠性

Rb-Sr 等时线作为岩浆岩的经典定年方法在上世纪 80~90 年代应用较广,但用于热液矿床定年则备受争议(Garven et al. , 1994 ; Bradley et al. , 2004 ;刘建明等 ,1998 ;李文博等 ,2002 ;杨向荣等 , 2009 ;汪晓虎等 ,2011)。随着高精度低检出限质谱仪以及制取超纯水和超纯酸等技术的出现 ,热液矿物的 Rb-Sr 等时线测年条件已得到改善。

李志昌等(2004)提出 ,成矿流体在地壳中长时间运移 ,可导致流体中 Sr 同位素组成均一化 ,而成矿环境的变化和结晶化学的差异 ,又引起 Rb-Sr 体系在不同矿物中出现分馏 ,因此 ,对于金属矿床中一组共生硫化物来说 ,能满足等时线条件 ,测定其同位素组成可直接得到成矿作用年龄。刘建明等(1998)

也认为 ,采用热液矿物组合的 Rb-Sr 等时线定年较单矿物更为理想 ,因为不同矿物相具有不同的化学势 ,从而使化学性质不明的 Rb 和 Sr 发生化学分异 ,结果是从同一成矿母溶液中沉淀出的一组共生矿物具有不同的 Rb-Sr 比值 ,可以更好地满足不同 $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\lambda}$ 值的测试前提 ,同时提高 Rb-Sr 等时线的精度。前人利用共生矿物组合进行 Rb-Sr 等时线定年取得成功的实例也较多(李文博等 ,2004 ;田世洪等 ,2009 ;陶琰等 ,2010 ;朱飞霖等 ,2011)。

热液矿物 Rb-Sr 等时线定年的基本前提是同源、同时、封闭性、一致的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\lambda}$ 值 ,以及不同的 $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\lambda}$ 值(李文博等 ,2002)。刘建明等(1998)指出 ,Rb、Sr 在热液矿物中有 3 种赋存状态 : ① 主矿物晶格中 ,② 固态微包体中 ,③ 流体包裹体中 ,由于测试样品中未发现 Rb 含量高和 Rb/Sr 比值大的矿物包体(如含钾矿物包体) ,因此 ,次生包裹体的存在对测试结果影响较大。李华芹等(待发表)研究认为 ,闪锌矿等热液矿物中的 Rb、Sr 主要赋存在

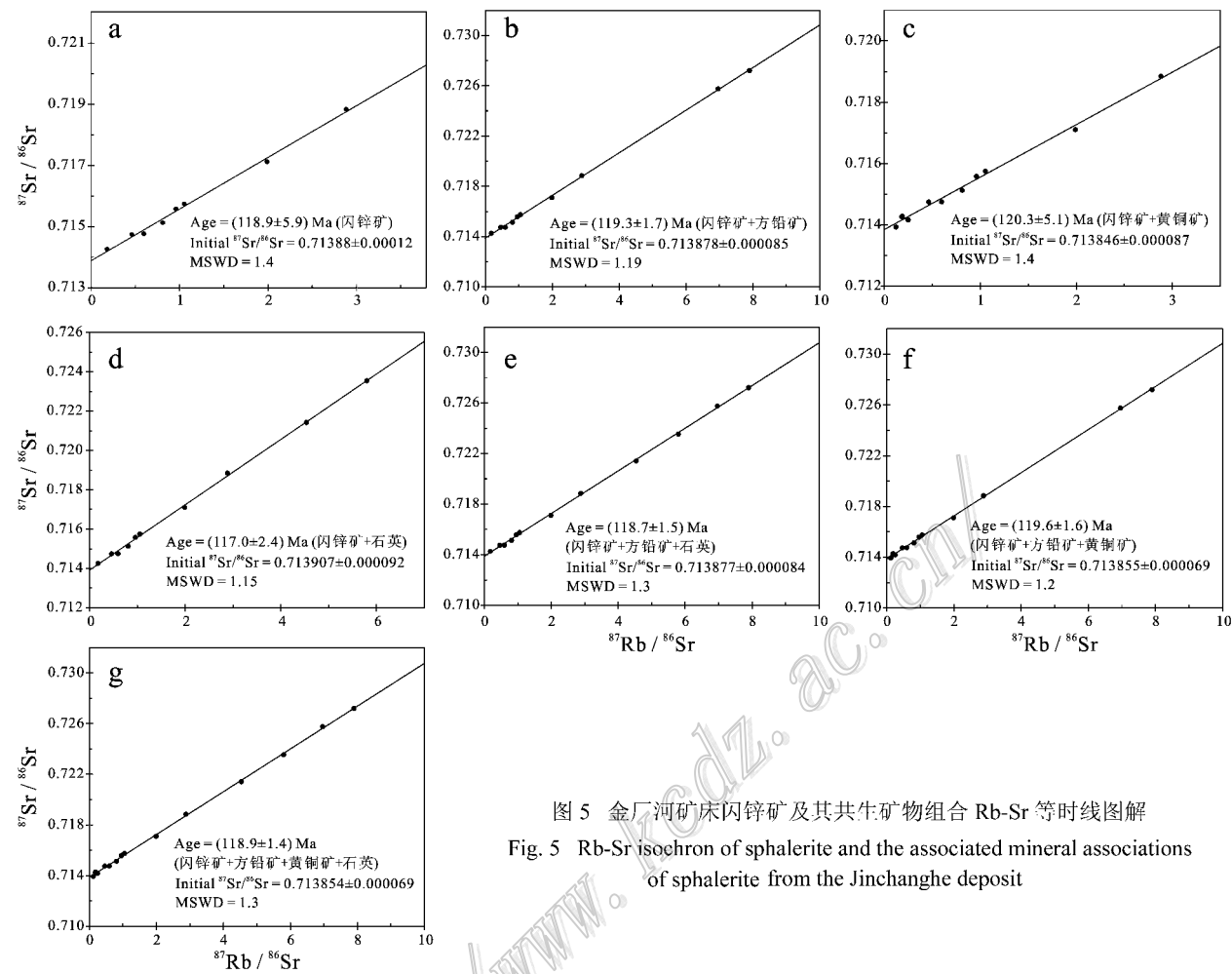


图 5 金厂河矿床闪锌矿及其共生矿物组合 Rb-Sr 等时线图解
Fig. 5 Rb-Sr isochron of sphalerite and the associated mineral associations
of sphalerite from the Jinchanghe deposit

矿物相中,而在流体相中的含量极低,去除原生包裹体对于 Rb-Sr 测年结果影响不大。因此,在本次测试过程中,将样品矿物研磨至 200 目后,应用超声波洗涤法进行清洗,基本上清除了次生及原生包裹体的干扰(刘建明等,1998;李文博等,2002)。刘建明等(1998)认为,在理论上,不同的矿物具有不同的 Rb/Sr 比值,热液矿床的形成时限一般为数百万年,一组热液共生矿物的生成时限则往往只有数十万年,但对于不同矿物的 Rb-Sr 等时线定年而言可视为基本上是同时生成。据此,本次测试流程满足等时线测年的基本前提。另外,本文的测试样品采自同一矿体局部的较小范围,均选取未见裂隙且结晶较好的致密块状矿石,闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、石英共生矿物的纯度均较高,最大程度地满足了同时、同源、封闭性、($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 值一致、($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) 值不同的 Rb-Sr 等时线测年的基本前提。

1/Rb- $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 以及 1/Sr- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解(图 6)

非线性相关性,测试样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值相对稳定,而 $\omega(\text{Rb})$ 、 $\omega(\text{Sr})$ 则不同,说明闪锌矿及其共生矿物在生长期间,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值基本上保持不变,表明了测试数据的合理性(李文博等,2002)。据此可认为,图 5 中的 7 条直线具有等时线意义。图 5 显示,所有的测试点几乎都落在这 7 条等时线上,表明被测试的共生矿物在其形成过程中 Sr 同位素是均一的,并且有着很好的封闭性。不同的共生矿物组合所拟合的等时线年龄在误差范围内是一致的,其变化范围为 117.0~120.3 Ma,可代表金厂河铁铜铅锌矿床的成矿年龄。

5.2 成矿物质来源

侯明兰等(2006)指出 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 值是判断成岩成矿物质来源的重要指标,在矿床地质研究中常应用其示踪成矿物质来源、深源流体、岩浆流体的壳幔混染作用。由于 Sr 同位素质量数大且不同同位素之间的相对质量差较小,因而,当其从源岩中被浸

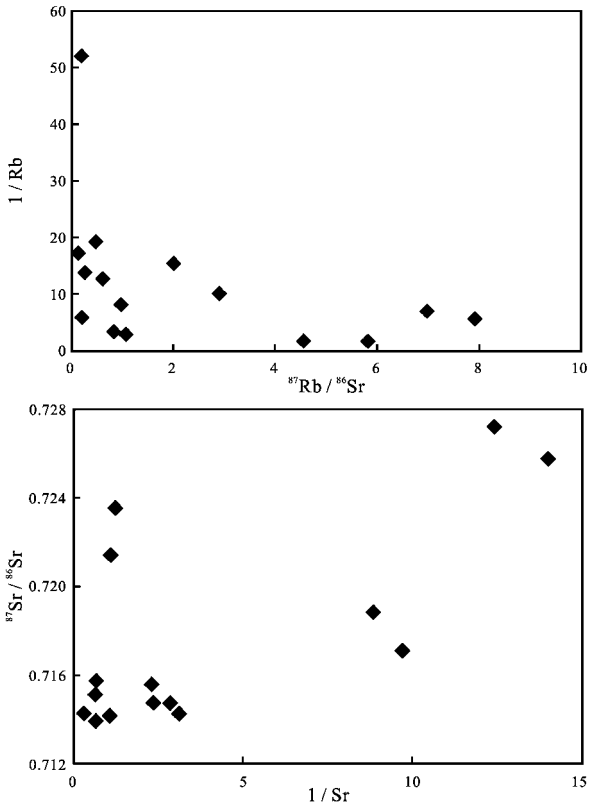


图 6 金厂河矿床闪锌矿及其共生矿物 方铅矿、黄铜矿、石英 的 $1/Rb$ - $^{87}Rb/^{86}Sr$ 和 $1/Sr$ - $^{87}Sr/^{86}Sr$ 关系图

Fig. 6 Diagrams of $1/Rb$ versus $^{87}Rb/^{86}Sr$ and $1/Sr$ versus $^{87}Sr/^{86}Sr$ of sphalerite and the associated mineral assemblages (galena, chalcopyrite and quartz) from the Jinchanghe deposit

取时,不仅不会产生同位素分馏,而且在转移进入成矿热液并随之迁移的过程中,即使成矿热液的物理化学条件发生了变化,但其同位素组成一般不会变化(沈渭洲,1997;范洪海等,2001)。在总结前人测定硫化物 Rb-Sr 年龄成功实例的基础上,李志昌等(2004)认为,在成矿作用过程中,成矿流体的 Rb-Sr 体系是能够达到平衡的, Sr 同位素组成基本上实现了均一化。因此,通过测定成矿期某些热液矿物及可能的矿源层的 Sr 同位素组成,即可判断矿床的成矿物质来源(Zartman,1984)。

根据金厂河矿区共生热液矿物的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 与 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 测试数据,同时为了避免放射性 ^{87}Rb 衰变对锶同位素所造成的影响,将成矿时代换算至 118 Ma,应用 Geokit 软件计算得到闪锌矿及其共生热液矿物的初始 Sr 同位素比值。由表 2 可见,金厂河区内闪锌矿及其共生矿物的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ 值为 $0.713\ 729 \sim 0.714\ 079$,平均值为 $0.713\ 885$,大致相当

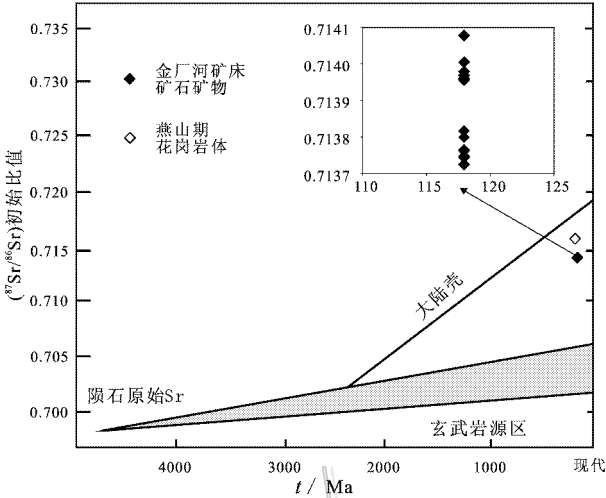


图 7 锶同位素在地幔和地壳中的演化 (底图据 Faure,1986)

Fig. 7 Strontium isotope evolution in the mantle and the crust (base map after Faure,1986)

于保山地块内燕山晚期花岗岩(如志本山花岗岩)的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ 值($0.716\ 810$)(张玉泉等,1990)。在 Sr 同位素地幔和地壳的演化图(图 7)中,金厂河矿床的矿石矿物及燕山期花岗岩的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ 值落在大陆壳随时间的演化线附近,反映出该矿床的成矿物质为地壳来源,其形成可能与保山地块内燕山晚期花岗岩岩浆活动有关。

据黄华等测试结果(未发表资料)可知,金厂河矿床内闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物的 $\delta^{34}S$ 值为 $3.9\text{‰} \sim 6.7\text{‰}$,平均为 4.9‰ ,表明成矿物质主要来源于深部岩浆,同时有少量地层硫混合的特点,并且,该矿床比地幔稍富重同位素 $\delta^{34}S$,反映了含矿岩浆是地壳物质重熔的产物(王长明等,2011)。该矿床主成矿阶段含矿方解石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值分别为 $-7.2\text{‰} \sim -3.7\text{‰}$ 和 $8.8\text{‰} \sim 10.6\text{‰}$,在方解石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ - $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 图解上落在花岗岩范围内,指示出成矿物质来源于深部花岗岩浆。该矿床的 S 、 C 同位素分析结果与 Sr 初始值所判别的成矿物质来源相一致,均来自深部岩浆,与花岗岩有密切的关系。

5.3 地质意义

金厂河矿床位于保山地块铅锌多金属成矿区,是三江成矿带的重要组成部分。三江成矿带位于特提斯构造域的东段,经历了晚古生代—中生代特提斯构造演化及新生代大陆碰撞造山的叠加转换,发

生了多幕式的大规模成矿作用和巨量金属的工业聚积(王安建等,2009)。该矿床所在的保山地块经历了古特提斯、中特提斯、新特提斯的演化,在早古生代、印支期、燕山期及喜马拉雅期都发生过成岩成矿事件。为了更好地了解金厂河矿区的成矿动力学背景,本次研究主要关注保山地块及其邻区的中特提斯洋的演化历程。

早二叠世至晚三叠世是中特提斯洋的扩张时期,腾冲地块与保山地块分离,形成了班公湖-怒江洋盆的东延分支海槽;中特提斯洋的碰撞拼合始于晚侏罗世(约159 Ma),于早白垩世(约99 Ma)完成,形成了班公湖-怒江缝合带,包括了腾冲地块与保山地块碰撞所形成的高黎贡碰撞构造带(钟大赉,1998;李朋武等,2005;陈福坤等,2006;莫宣学等,2006;陶琰等,2010)。保山地块内的燕山期岩浆活动与中特提斯洋的闭合密切相关,在该地块内部形成了志本山岩体和柯街岩体,其锆石 U-Pb 年龄分别为 (126.7 ± 1.6) Ma 和 (93 ± 1.3) Ma(陶琰等,2010),在班公湖-怒江缝合带的南缘形成了高黎贡花岗岩,其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为126~118 Ma,为早白垩世晚期(杨启军等,2006)。研究显示,上述区域岩浆活动与区域构造事件的发生具有密切的时空联系,受腾冲地块与保山地块碰撞作用的影响,在保山地块内部,由于地壳加厚导致地壳重熔而产生了岩浆作用、混合岩化作用及相应的成矿作用,高黎贡、志本山和柯街花岗岩的过铝性质也表明岩浆活动与地壳加厚作用有关(陶琰等,2010)。前人认为,保山地块内早白垩世形成的花岗岩主要来源于地壳物质(杨启军等,2006;陶琰等,2010),与金厂河矿床的成矿物质来源相一致。

金厂河矿床的 Rb-Sr 同位素测年结果(118 Ma 左右,早白垩世)与赋矿地层寒武系之间存在着明显的时间差,表明该矿床并非同生矿床,而是后生成矿作用形成的矿床。据符德贵等(2004)资料,金厂河矿区为区域重力负异常区,据此推测区内存在隐伏岩体,黄华等(待发表)对该矿区矽卡岩所进行的矿物学研究表明,区内的钙矽卡岩-含锰矽卡岩系列与铁铜铅锌矿化密切相关,显示出存在隐伏岩体且为成矿提供了物质和热量来源。因此本文认为,金厂河矿床的成矿作用发生于早白垩世,与保山地块内燕山期过铝质花岗岩岩浆活动关系密切,该地块内的典型矿床除本次研究的金厂河矿床外,还有核桃坪铅锌矿床及芦子园铅锌矿床,前人对其进行过 Rb-

Sr 等时线定年,结果显示其成矿年龄分别为 (116.1 ± 3.9) Ma(陶琰等,2010)和 (141.9 ± 2.6) Ma(朱飞霖等,2011),表明这些矿床是同一地质事件的产物。

结合区域地球动力学演化可知,金厂河矿床形成于腾冲地块与保山地块碰撞的动力学背景下,保山地块内部发生了地壳缩短加厚,从而导致地壳发生深熔作用,与地块内的燕山期岩浆活动关系密切,是对中特提斯洋闭合过程中碰撞造山作用的响应。

综上所述,对金厂河矿床的年代学研究不仅为厘定该矿床的成矿时代及认识其成矿背景提供了新的可靠依据,而且,从成矿时代以及区域燕山期岩浆活动关系密切的角度,进一步说明了该矿床为矽卡岩成因。金厂河矿床与核桃坪铅锌矿床、芦子园铅锌矿床一起,构成了保山地块内与燕山期岩浆活动有关的成矿作用的产物,对于保山地块,甚至滇西地区的同类型或同期矿床也具有一定的约束和借鉴意义。

6 结 论

(1) 本次研究选取三江地区保山地块内金厂河铁铜铅锌多金属矿床石英硫化物阶段的闪锌矿及与之共生的方铅矿、黄铜矿、石英样品进行了 Rb-Sr 同位素测年,利用不同的矿物进行相互制约、相互验证,测得其成矿年龄为118 Ma 左右,表明其成矿时代为早白垩世,与赋矿地层寒武系之间存在着明显的时间差,指示出其为后生成矿作用所形成的矿床。

(2) 闪锌矿及其共生矿物方铅矿、黄铜矿、石英的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.713\,729 \sim 0.714\,079$,平均为 $0.713\,885$,大致相当于保山地块内志本山花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值,反映出该矿床的成矿物质为地壳来源,其形成可能与该地块内燕山晚期花岗岩岩浆活动有关。

(3) 金厂河铁铜铅锌多金属矿床的形成是对中特提斯洋闭合过程中腾冲地块与保山地块碰撞造山作用的响应,与燕山期地块内部受碰撞影响而导致地壳深熔作用所产生的岩浆作用有关。

志 谢 在成文过程中,得到了毛景文研究员的指导,野外工作期间,得到了云南黄金矿业集团股份有限公司的大力支持和帮助;南京大学现代分析中心同位素分析室的王银喜教授在实验过程中给予了热情的指导和帮助;在资料收集过程中得到了中

国地质大学(北京)胡乔青博士、张立成硕士、郑伟硕士的帮助。在此一并感谢!

参考文献/References

- 陈福坤,李秋立,王秀丽,李向辉. 2006. 滇西地区腾冲地块东侧混合岩锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 22(2): 439-448.
- 邓必方. 1995. 保山-镇康地区汞、铅锌矿床的成矿模式[J]. 云南地质, 14(4): 355-364.
- 董美玲,董国臣,莫宣学,朱弟成,聂飞,谢许峰,王霞,胡兆初. 2012. 滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义[J]. 岩石学报, 28(5): 1453-1464.
- 范洪海,凌洪飞,王德滋,沈渭洲,刘昌实,姜耀辉. 2001. 江西相山钨矿田成矿物质来源的 Nd、Sr、Pb 同位素证据[J]. 高校地质学报, 7(2): 139-145.
- 符德贵,崔子良,官德任. 2004. 保山金厂河铜多金属隐伏矿综合找矿[J]. 云南地质, 23(2): 188-198.
- 韩发. 2006. 如何解释陈家杖子金矿的铅同位素资料——与余宏全等商榷[J]. 矿床地质, 25(5): 582-589.
- 侯明兰,蒋少涌,姜耀辉,凌洪飞. 2006. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2524-2533.
- 胡乔青,王义天,王瑞廷,李建华,代军治,王双彦. 2012. 陕西凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代: 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据[J]. 岩石学报, 28(1): 258-266.
- 黄智龙,陈进,韩润生. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因——峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社. 77-87.
- 李华芹. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社. 266 页.
- 李朋武,高锐,崔军文,管焯. 2005. 西藏和云南三江地区特提斯洋演化历史的古地磁分析[J]. 地球学报, 26(5): 387-404.
- 李文博,黄智龙,许德如,陈进,许成,管涛. 2002. 铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述[J]. 大地构造与成矿学, 26(4): 436-441.
- 李文博,黄智龙,陈进,韩润生,张振亮,许成,管涛. 2004. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究[J]. 矿物学报, 24(2): 112-116.
- 李文桦,李雷,赵荣宽,陈仪,赵重顺,曾荣贵,杨朝梁. 1985. 龙陵勐兴铅锌矿床的沉积成矿因素[J]. 云南地质, 4(3): 235-244.
- 李志昌,路远发,黄圭成. 2004. 放射性同位素地质学方法与进展[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 37-46.

- 刘建明,赵善仁,沈洁,姜能,霍卫国. 1998. 成矿流体活动的同位素定年方法评述[J]. 地球物理学进展, 13(3): 46-54.
- 莫宣学,潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 13(6): 43-51.
- 沈渭洲. 1997. 同位素地质学教程[M]. 北京: 原子能出版社. 242-245.
- 陶琰,胡瑞忠,朱飞霖,马言胜,叶霖,程增涛. 2010. 云南保山核桃坪铅锌矿成矿年龄及动力学背景分析[J]. 岩石学报, 26(6): 1760-1772.
- 田世洪,杨竹森,侯增谦,刘英超,高延光,王召林,宋玉财,薛万文,鲁海峰,王富春,苏媛娜,李真真,王银喜,张玉宝,朱田,俞长捷,于玉帅. 2009. 玉树地区东莫扎拉和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(6): 747-758.
- 王安建,曹殿华,管焯,刘俊来,李文昌. 2009. 西南三江成矿带中南段金属矿床成矿规律与若干问题探讨[J]. 地质学报, 83(10): 1365-1375.
- 王长明,徐贻麟,吴金国,张达,杨磊,刘建光,万浩章,狄永军,余心起,何明跃,王士士. 2011. 江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田碳、氧、硫、铅同位素特征及成矿物质来源[J]. 地学前缘, 18(1): 179-193.
- 王晓虎,侯增谦,宋玉财,杨天南,张洪瑞. 2011. 兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属矿床: 成矿年代及区域成矿作用[J]. 岩石学报, 27(9): 2625-2634.
- 王银喜,杨杰东,陶先聪,李惠民. 1988. 化石、矿物和岩石样品的 Sm-Nd 同位素实验方法研究及其应用[J]. 南京大学学报, 24(2): 297-308.
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,张开均,李惠民,吴昌志,杨杰东. 2005. 博格达裂谷闭合和区域隆起的同位素年代学证据及地质意义[J]. 地球学报, 26(增): 102-104.
- 夏庆霖,陈永清,卢映祥,蒋成,刘红光,吕志成. 2005. 云南芦子园铅锌矿床地球化学、流体包裹体及稳定同位素特征[J]. 地球科学, 30(2): 177-186.
- 熊昌利,贾小川,杨学俊,罗改,白宪洲,黄柏鑫. 2012. 滇西龙陵地区勐冒奥陶纪二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境[J]. 地质通报, 31(2-3): 277-286.
- 薛传东,韩润生,杨海林,杨志明,田世洪,刘勇强,郝百武. 2008. 滇西北保山核桃坪铅锌矿床成矿流体来源的同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 27(2): 243-252.
- 杨启军,徐义刚,黄小龙,罗震宇. 2006. 高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 22(4): 817-834.
- 杨向荣,彭建堂,胡瑞忠. 2009. 闪锌矿铷-锶同位素等时线讨论[J]. 地质论评, 55(3): 370-374.
- 杨玉龙,叶霖,程增涛,鲍谈,高伟. 2012. 保山镇康地块矽卡岩型铅锌矿床成因初探[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 554-

- 564.
- 袁顺达,李惠民,郝 爽,耿建珍,张东亮. 2010. 湘南芙蓉超大型锡矿锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及其意义[J]. 矿床地质, 29(增): 543-544.
- 袁顺达,张东亮,双 燕,杜安道,屈文俊. 2012. 湘南新田岭大型钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 27-38.
- 云南黄金矿业集团股份有限公司. 2010. 云南省保山市隆阳区金厂河锌多金属矿床详查报告[R]. 内部资料.
- 张长青,李向辉,余金杰,毛景文,陈福坤,李厚民. 2008. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷锶测年及地质意义[J]. 地质论评, 54(4): 145-151.
- 张恩才,陈新敏,李志宏,董学兰,杨苏焕. 2010. 云南保山珑阳矿集区矿床分带及其找矿意义[J]. 云南地质, 29(2): 141-145.
- 张玉泉,谢应雯,成忠礼. 1990. 三江地区含锡花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄[J]. 岩石学报, (1): 75-81.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社. 231 页.
- 周 荣,陈均,吕永增,董文伟. 2008. 保山金厂河大型铜铁多金属隐伏矿床[J]. 云南地质, 27(2): 189-196.
- 朱飞霖,陶 琰,胡瑞忠,廖名扬,王银喜,李玉帮. 2011. 云南镇康芦子园铅-锌矿的成矿年龄[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(1): 73-79.
- 朱余银,韩润生,薛传东,陆森林,邹海俊,袁志红. 2006. 云南保山核桃坪铅锌矿床地质特征[J]. 矿产与地质, 20(1): 32-35.
- Bradley D C, Leach D L, Symons D, Emsbo P W, Breit G and Sangster D F. 2004. Reply to discussion on "Tectonic controls of Mississippi valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands" by Kyle S E, Misra K C, Muchez P and van der Voort R. Mineralium Deposita [J]. Mineralium Deposita, 39(4): 515-519.
- Brannon J C, Podosek F A and Melimans R K. 1992a. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin[J]. Nature, 356: 509-511.
- Brannon J C, Frank A, Podosek F A and Melimans R K. 1992b. A clue to the origin of dark and light bands of the 270 Ma Upper Mississippi Valley (UMV) zinc-lead district, southwest Wisconsin[J]. Abstracts with Programs-Geological Society of America, 24: 353.
- Chen F K, Li X H, Wang X L, Li Q L and Siebel W. 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China[J]. Int. J. Earth Sci., 96: 1179-1194.
- Christensen J N, Halliday A N, Stephen E K and Sangster D F. 1993. Further evaluation of the Rb-Sr dating of sphalerite: The Nanisivik Precambrian MVT deposit, Baffin Island, Canada[J]. Abstracts with Programs-Geological Society of America, 25: 471.
- Christensen J N, Halliday A N, Kenneth E L, Roderick N R and Stephen E K. 1995a. Direct dating of sulfides by Rb-Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 5191-5197.
- Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R and Stephen E K. 1995b. Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct dating of sulfides: Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-type deposits, Canning Basin, Australia[J]. Econ. Geol., 90: 877-884.
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology[M]. New York: John Wiley & Sons (2nd edition). 183-199.
- Garven G and Sverjensky D A. 1994. Paleohydrogeology of the Canadian Rockies and origins of brines, Pb-Zn deposits and dolomitization in the Western Canada Sedimentary Basin: Comment and Reply[J]. Geology, 22(12): 1149-1150.
- Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Huang Z L, Lai S C, Yuan H L, Liu X M, Coulson I M, Feng G Y, Wang T and Qi Y Q. 2009. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan Block, western Yunnan province, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 36: 168-182.
- Mao J W, Du A D, Seltmann R and Yu J J. 2003. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia[J]. Mineralium Deposita, 38: 251-257.
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Stein H J and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 29: 307-324.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Ye H S, Qu W J, Du A D, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 72: 4607-4626.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E and Jones H D. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley type ore deposit[J]. Nature, 346: 354-357.
- Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, Jones H D, Kyle J R and Lane T E. 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley (MVT) ore deposits[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 57: 417-427.
- Pettke T and Diamond L W. 1996. Rb-Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-host mineral isochrones: a clarification of why it works[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 91(5): 951-956.

- Sangster D F. 1996. Mississippi Valley-type lead-zinc[A]. In : Eckstrand O R , Sinclair W D and Thorpe R I , eds. Geology of Canadian Mineral Deposit Types[C]. Geology of Canada , No. 8 : Geological Survey of Canada. 253-261.
- Stein H J , Markey R J , Morgan J W , Du A D and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt , Shanxi Province , China[J]. Econ. Geol. , 92 : 827-835.
- Yuan S D , Peng J T , Hu R Z , Li H M , Shen N P and Zhang D L. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan , South China)[J]. Mineralium Deposita , 43 : 375-382.
- Yuan S D , Peng J T , Hao S , Li H M , Geng J Z and Zhang D L. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit , Hunan Province , South China : New constrains on the timing of tin-polymetallic mineralization [J]. Ore Geology Reviews , 43 : 235-242.
- Zartman R E L. 1984. Strontium and neodymium isotopic characterization of mineral deposits relative to their geologic environments[J]. Proceedings of the 27th IGC , 12 : 50-73.

<http://www.kcdz.ac.cn/>