

文章编号: 0258-7106 (2013) 02-0259-14

广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义*

郑伟¹, 陈懋弘², 徐林刚^{2* * *}, 赵海杰², 凌世彬³, 吴越¹, 胡耀国⁴,
田云⁵, 吴晓东⁵

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 云浮星辰矿业有限公司, 广东 云浮 527434; 4 广东省地质调查院, 广东 广州 510080; 5 广东省有色金属地质局,
广东 广州 510080)

摘要 文章选取 8 件闪锌矿、3 件方铅矿和 1 件黄铁矿样品, 采用 Rb-Sr 等时线定年方法测定天堂铜铅锌多金属矿床的成矿时代。获得闪锌矿等时线年龄为 (98.1 ± 1.6) Ma, 闪锌矿 + 方铅矿等时线年龄为 (99 ± 2) Ma, 闪锌矿 + 方铅矿 + 黄铁矿等时线年龄为 (98.2 ± 1.3) Ma, 闪锌矿 + 黄铁矿等时线年龄为 (97.87 ± 0.96) Ma, 方铅矿 + 黄铁矿等时线年龄为 (98.6 ± 4.2) Ma。Rb-Sr 定年结果表明, 天堂铜铅锌多金属矿床的成矿时代为 98 Ma 左右, 矿床形成于晚白垩世早期, 可能与 135 Ma 之后太平洋板块的运动方向发生转向, 使得中国大陆包括华南板块在内均处于持续伸展阶段有关。硫化物矿石 Rb-Sr 所得的 Sr 同位素初始比 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 平均值为 0.7117, 小于陆源硅酸盐的值 (0.720), 高于地幔 Sr 的初始值 0.707, 结合笔者对该矿床所做的 S、Pb 等同位素组成特征研究, 显示成矿物质来源于壳幔混合。研究表明, 利用特定矿床的主要矿石矿物, 采用 Rb-Sr 等时线定年方法通过共生矿物组合和单矿物相互约束, 可以有效地确定成矿时代, 这对了解矿床的成矿背景等具有一定的指示意义。

关键词 地球化学 闪锌矿 共生矿物 Rb-Sr 定年 成矿时代 天堂铜铅锌矿

中图分类号: P618.41 P618.42 P618.43

文献标志码: A

Rb-Sr isochron age of Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance

ZHENG Wei¹, CHEN MaoHong², XU LinGang², ZHAO HaiJie², LING ShiBin³, WU Yue¹,
HU YaoGuo⁴, TIAN Yun⁵ and WU XiaoDong⁵

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;
2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Xingchen Mining Limited Liability Company of Yunfu, Yunfu 527434, Guangdong, China; 4 Geological Survey of Guangdong Province, Guangzhou 510080, Guangdong, China; 5 Geological Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

Abstract

The ages of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit were determined by the Rb-Sr isochron method through dating samples of sphalerite and three groups of intergrown mineral assemblage (pyrite and galena). The selected samples included eight pieces of sphalerite, three pieces of galena and one piece of pyrite. In con-

* 本文得到国家自然科学基金项目 (No. 40930419)、中国地质调查局地质调查工作项目 (1212011120831) 和国家重点基础研究发展计划 973 课题 (2012CB416704) 的联合资助

第一作者简介 郑伟, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: zhengwei19880824@126.com

* * 通讯作者 徐林刚, 男, 1981 年生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: xulingang@sina.com

收稿日期 2012-09-08; 改回日期 2013-02-20。秦思婷编辑。

trast with sphalerite age of (98.1 ± 1.6) Ma and sphalerite + galena pyrite assemblage age of (99 ± 2) Ma, the authors also obtained sphalerite + galena + pyrite assemblage age of (98.2 ± 1.3) Ma, sphalerite + pyrite age of (97.87 ± 0.96) Ma and galena + pyrite assemblage age of (98.6 ± 4.2) Ma by the same means. These data convince the authors that the metallogenic epoch is about 98 Ma, and that the Late Cretaceous is the main time for the formation of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit. The ore-forming process was probably related to the fact that China's mainland including South China Plate was in a continuous stretching phase caused by the change of the movement direction of the Pacific Plate after 135 Ma. The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of sulfides is equal to 0.7117 and it is lower than that of the terrigenous silicates (0.720) and higher than that of the mantle (0.707). In combination with S and Pb isotope data available, the authors consider that the ore-forming material of the ore bodies in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit was derived from the crust-mantle mixture. It is thus held that direct dating of the ages of metal minerals by using Rb-Sr isochron method for single minerals and mineral assemblages could serve as a routine chronological method, and that the means is of importance for indicating and understanding metallogenic background of the ore deposit.

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

精确测定金属矿床的成矿时代,对于正确认识矿床成因和控矿因素、总结成矿规律并指导找矿勘探都具有极为重要的意义(程裕淇,1983;翟裕生等,1992,2008;裴荣富等,1993;1994;陈毓川等,1994;刘建明等,1998a;毛景文等,2000;2005;2006)。辉钼矿 Re-Os 和含钾矿物的 Ar-Ar 方法精度较高,被广泛使用(York et al., 1970; Lanphere et al., 1971; Walker et al., 1982; FoLand et al., 1989; Stein et al., 1998; 2001; Mao et al., 1999; 2003; 2006; 2008c; Barra et al., 2002; 毛景文等,2004a; 聂凤军等,2007)。但目前铅锌矿床成矿年龄的精确测定仍是一个世界性的难题(李文博等,2002),全球研究程度最高的 MVT 矿床也是如此(Sangster, 1996; Leach et al., 2001; 2005),主要是由于缺少精确测年所需的矿物。但也有不少成功的实例报道,如闪锌矿 Rb-Sr 法(Brannon et al., 1992a; 1992b; Nakai et al., 1993; Christensen et al., 1993; 1995a; 1995b; Pettke et al., 1996; 张长青等,2008; 胡乔青等,2012)、闪锌矿流体包裹体 Rb-Sr 法(Nakai et al., 1990)。

1966 年,广东省地质局 723 队对天堂多金属矿床进行了详查,以铜为主要勘查对象;1966 年至 1975 年,704 队扩增了该矿区铅、锌、铜的储量;90 年代初,铅、锌储量又有了比较大的突破。但目前还有很多问题需要进一步探讨,粤西天堂铜铅锌多金属矿床的成矿时代即是关注的问题之一。前人仅报道了该区成矿年龄为 94 Ma(翟裕生等,1999),未提及

具体的测试方法。本文在详细研究天堂铜铅锌多金属矿床的地质特征基础上,选取了石英硫化物阶段的闪锌矿及其共生的矿物组合(黄铁矿与闪锌矿、黄铁矿与方铅矿、方铅矿与闪锌矿等)开展 Rb-Sr 同位素定年研究,尝试获得一组可以相互验证的年龄数据,以便基本确定其成矿时代,进而为探索成矿地质背景提供新的依据。

1 区域地质背景

天堂铜铅锌多金属矿床位于钦-杭成矿带西南端的阳春盆地中。区内大地构造位置处于粤西-桂东南加里东隆起和中海西期拗陷的接壤部位,地处华南褶皱系的南西段,构造上位于 NE 向吴川-四会大断裂中部主断裂的东南侧(图 1),经历了多次开裂和晋宁期、加里东期、印支期碰撞拼贴造山作用(胡开明,2001;周永章等,2012)。中生代以来,区内经历了复式褶皱断裂和岩浆反复侵入的复杂过程,形成了多种内生金属矿产和非金属矿产。

阳春盆地内及其周边出露的地层主要有寒武系、石炭系、泥盆系、侏罗系以及第四系。基底主要由寒武系组成,岩性以浅变质复理石砂页岩为主,分布在盆地两侧,而盖层为上古生界,包括碳酸盐岩、浅海相碎屑岩、砂页岩和海陆交互相含煤地层,最上部零星不整合上覆着侏罗系的陆相碎屑岩。地层总体呈 NE 向分布。泥盆系和石炭系出露广泛,为盆地重要的含矿层或赋矿层。据沈睿文等(2010)的研

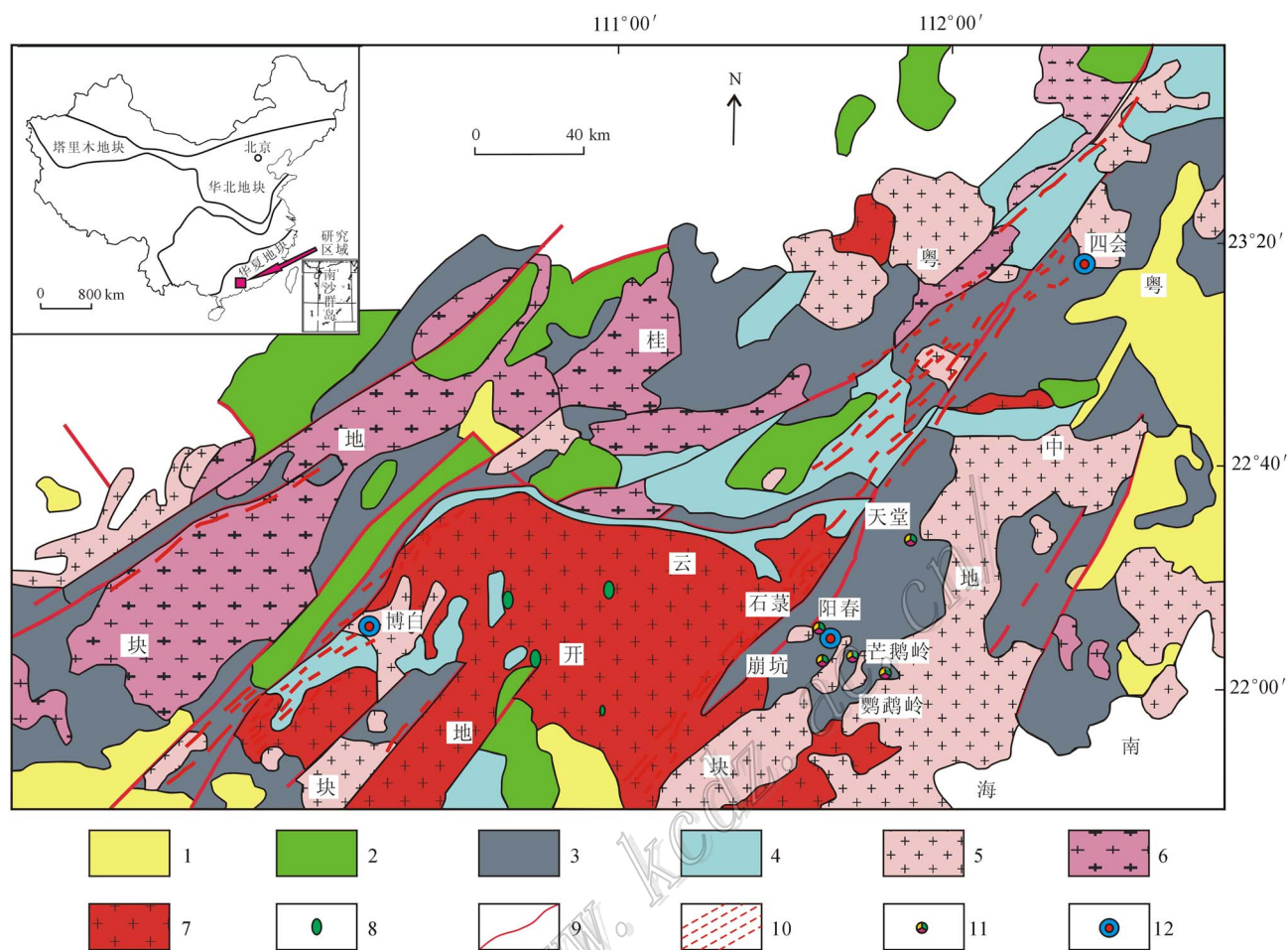


图 1 云开地区地质构造略图(改自彭松柏等, 2006)

1—新生界砂岩、粉砂岩、泥岩、砂砾岩、黏土; 2—中生界砾岩、砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩; 3—古生界浅变质复理石砂页岩、碳酸盐岩、浅海相碎屑岩; 4—新元古界云开群类复理石浅变质岩类夹变质火山岩; 5—燕山期花岗岩; 6—海西期—印支期花岗岩; 7—加里东期花岗岩; 8—变基性超基性岩; 9—地块边界断裂; 10—韧性剪切带; 11—主要矿床; 12—地名

Fig. 1 Geological sketch map of Yunkai area(modified after Peng et al., 2006)

1—Cenozoic Formation: sandstone, siltstone, mudstone, glutinite and clay; 2—Mesozoic Formation: conglomerate, sandstone, siltstone and silty mudstone; 3—Paleozoic Formation: flysch formation of epimetamorphic carbonate rock and clastic rocks of neritic facies; 4—Neo-proterozoic Yunkai Formation: quasi-flysch formation interlayered with meta-volcanic rocks; 5—Yanshanian granite; 6—Hercynian-Indosinian granite; 7—Caledonian granite; 8—Basic and ultrabasic rocks; 9—Fault along boundary of land mass; 10—Ductile shear zone; 11—Major ore deposit; 12—Place name

究,铜矿床主要产在寒武系、石炭系、泥盆系和侏罗系中,而铅锌主要赋存在泥盆系和石炭系的碳酸盐岩中,第四系常发育砂锡矿及孔雀石铜矿等。

阳春盆地是由一系列 NNE 向-NE 向背斜和向斜组成的复式向斜构造盆地。褶皱、断裂较为发育,主要为 NE 向-NNE 向组,规模较大,分布广泛,其次为 NW 向-NWW 向组,在北东段的天堂一带分布比较窄。区内岩浆活动较为强烈,盆地内及南侧广泛发育中基性侵入岩和花岗岩类侵入体,地表出露约

30 多个(沈睿文等, 2010)。除马山等少数岩体为印支期外,大部分为燕山期产物。赵子杰等(1985)根据岩石类型和含矿性,将盆地内花岗岩分为 2 类:一类是与铁、铜、钼及铅锌多金属矿床有关的中酸性花岗岩类,包括与岗尾、石茛、黑石岗、天堂等矿床形成有关的岩体,简称岗尾-石茛型花岗岩类,属于 I 型花岗岩类;另一类是与钨、锡矿床有关的黑云母花岗岩类,形成了小南山、锡山、鹦鹉岭等矿床,简称小南山-锡山型花岗岩类,属于 S 型花岗岩类。

2 矿床地质特征

天堂矽卡岩型铜铅锌多金属矿床地理位置: 东经 112°2'30", 北纬 22°35'5", 地处阳春复向斜的北东扬起端南东翼, NNE 向-NE 向吴川-四会深大断裂带旁侧次级屋背岭-爱国-岗足构造-岩浆带中, 赋存于屋背岭燕山期花岗岩体与泥盆系上统天子岭组灰岩、泥灰岩的接触带(图 2)中。矿区内出露的地层主要为上泥盆统天子岭组(D_{3t})薄层状泥灰岩和灰岩透镜体, 是本矿区赋矿的主要围岩。

矿区内断裂、褶皱构造发育。断裂构造线方向主要为 NE 向-NNE 向, NW 向和 NEE 向 3 组, 与区域上构造线方向基本一致。褶皱以向斜为主, 包括油麻岗向斜, 屋背岭向斜及次一级的小向斜、小背斜。其中, 屋背岭向斜为天堂铜多金属矿床的控矿构造, 处于褶皱轴弯曲和波状起伏的枢纽部位, 属于应力集中的范围, 导致岩层产生横张裂隙, 与发育于向斜轴部的纵向断裂形成有利的成矿构造部位, 构造裂隙较为发育, 二长花岗斑岩即沿此构造脆弱部位侵入。本区主要的铜铅锌矿段便赋存在这种层间的构造裂隙中。

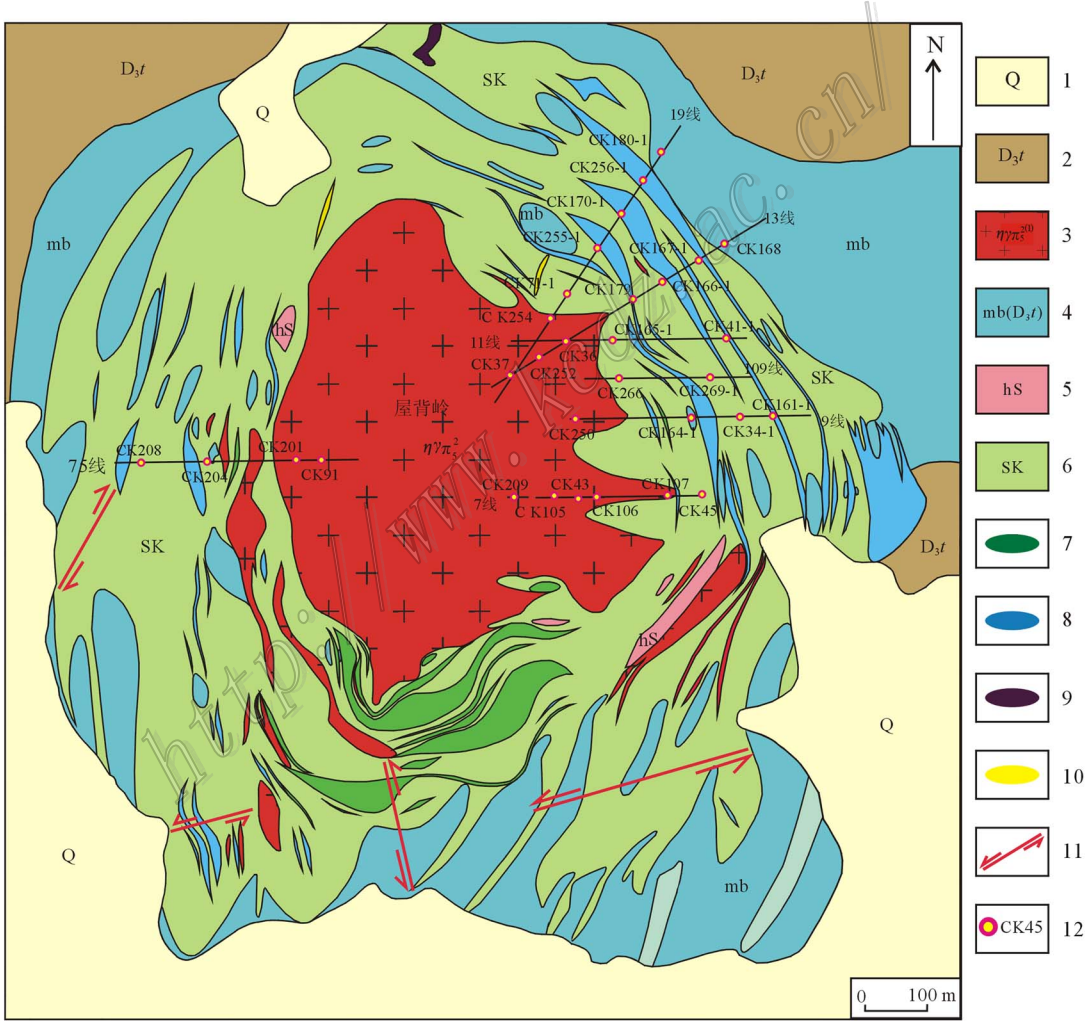


图 2 天堂铜铅锌多金属矿床地质略图(据广东省 704 地质队, 2011)

1—第四系冲洪积物; 2—泥盆系天子岭组灰岩、泥灰岩; 3—燕山期二长花岗岩; 4—大理岩; 5—角岩; 6—矽卡岩; 7—铜矿体; 8—铅锌矿体; 9—褐铁矿体; 10—重晶石脉; 11—平移断层; 12—钻孔

Fig.2 Simplified geological map of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (modified after No. 704 Geological Party of Guangdong Province, 2011)

1—Quaternary alluvial-diluvial material; 2—Devonian Tianziling Formation: limestone, argillaceous limestone; 3—Yanshanian adamellite; 4—Marble; 5—Hornstone; 6—Skarn; 7—Copper ore body; 8—Lead-zinc ore body; 9—Limonite ore body; 10—Barite vein; 11—Translational fault; 12—Drill hole

与成矿关系密切的二长花岗斑岩体出露于屋背岭一带,面积约 0.34 km²,其与围岩接触的部位,局部相变为花岗闪长岩。岩体具斑状结构,斑晶以斜长石为主。主要矿物为斜长石(含量 30%~35%)、钾长石(含量 20%~25%)、石英(含量 20%~30%)、黑云母(含量 3%~5%)。副矿物有锆石、磁铁矿、榍石、磷灰石、金红石、白钛石等。王联魁等(2001)对矿区二长花岗斑岩的岩石地球化学研究表明,岩体为高钾钙碱性系列岩石,成岩年龄(K-Ar 法测定)为 111 Ma,属白垩纪岩浆活动的产物(袁正新,1995)。

天堂大型铜铅锌多金属矿床共 192 个矿体,主矿体 14 个,矿体呈似层状、层状、透镜状、不规则状等产出于矽卡岩和矽卡岩化大理岩中。由岩体向外表现出铜铁→铜锌→铅锌→铅的矿化分带规律(图 3)。矿化主要包括黄铜矿化、方铅矿化、闪锌矿化等,铜铅锌金属量>70 万 t。w(Pb)一般为 1%~3%,最高 35.3%,全区平均 2.12%;w(Zn)一般为 0.9%~1.5%,最高 18.28%,平均 1.38%;w(Cu)一般为 0.4%~1%,最高 7.62%,平均 0.57%(广东省 704 地质队,2011)。

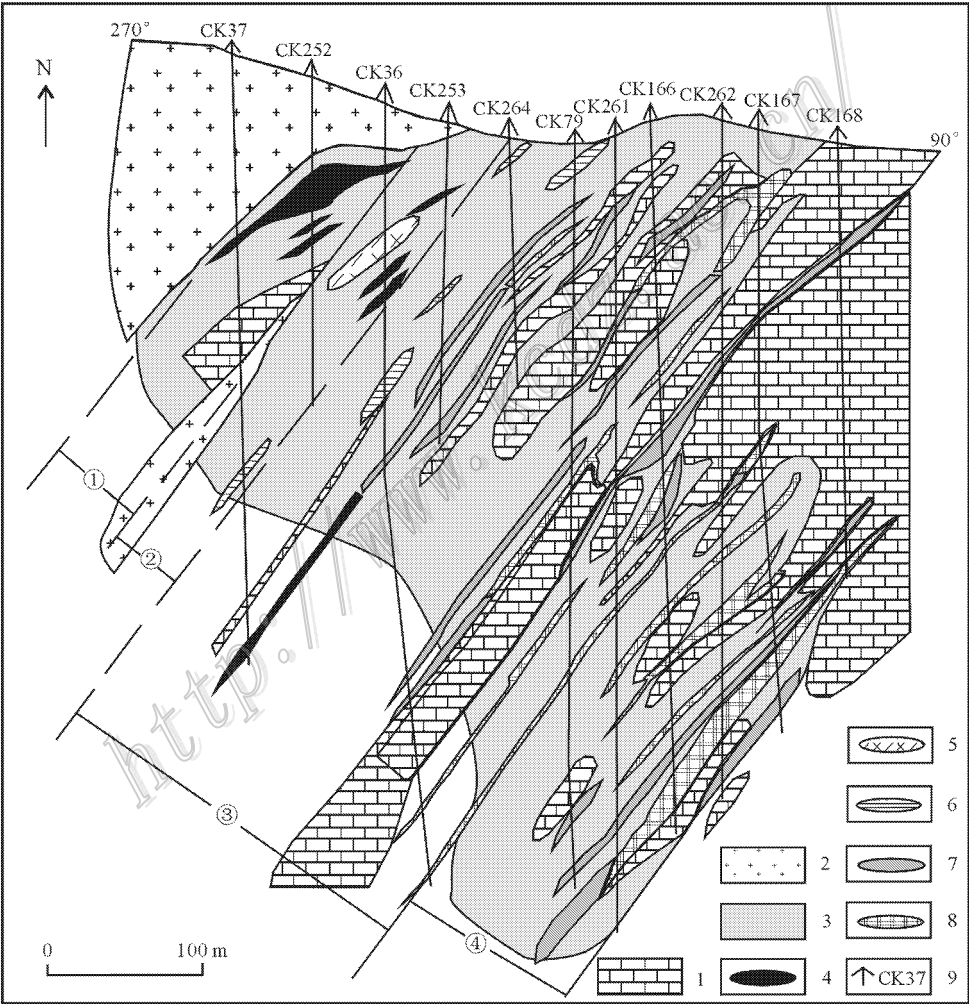


图 3 天堂铜铅锌多金属矿床二号矿带 13 勘探线剖面图(据广东省 704 地质队,2011)

1—泥盆系天子岭组灰岩;2—燕山期二长花岗岩;3—矽卡岩;4—铜矿体;5—铜锌矿体;6—锌矿体;7—铅锌矿体;8—铅矿体;9—钻孔
①—黄铜矿;②—黄铜闪锌矿;③—方铅闪锌矿;④—方铅矿

Fig. 3 Geological cross-section along No. 13 exploration line of No. 2 metallogenic belt in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (modified after No. 704 Geological Party of Guangdong Province, 2011)

1—Devonian Tianziling Formation : limestone ; 2—Yanshanian adamellite ; 3—Skarn ; 4—Copper ore body ; 5—Copper-zinc ore body ; 6—Zinc ore body ; 7—Lead-zinc ore body ; 8—Lead ore body ; 9—Drill hole
①—Chalcopyrite ; ②—Chalcopyrite-sphalerite ; ③—Galena-sphalerite ; ④—Galena

矿石矿物包括方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、白铅矿、自然铜、蓝辉铜矿等,脉石矿物包括石榴子石、硅灰石、透辉石、符山石、绿泥石、绿帘石、方解石、石英、石膏、玉髓等。矿石常呈他形-半自形粒状、自形粒状、碎裂结构、溶蚀交代结构、固溶体分离结构等,稀疏浸染状、稠密浸染状、条带状、细脉浸染状、团块状等构造。

矿区矽卡岩广泛发育,与成矿关系密切,根据矽卡岩矿物组合,将区内的矽卡岩分为石榴子石矽卡岩、石榴子石硅灰石矽卡岩、透辉石石榴子石矽卡岩、绿帘石石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩等,其中以石榴子石矽卡岩和石榴子石硅灰石矽卡岩为主。区内主要的围岩蚀变有矽卡岩化、硅化、绿帘石化、蛇纹石化、绿泥石化、黄铁矿化等,具有一定规律的蚀变分带特征。由岩体向外,矽卡岩组合依次为石榴子石矽卡岩→透辉石石榴子石矽卡岩→符山石石榴子石矽卡岩→硅灰石石榴子石矽卡岩→绿泥石石榴子石矽卡岩。通过系统的野外观察及显微镜鉴定,将该矿床形成过程划分为 4 个阶段:矽卡岩阶段、退化蚀变岩阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐化阶段。其中,石英-硫化物阶段主要形成黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物。

3 样品特征与测试方法

用于 Rb-Sr 等时线年龄测定的样品均采于石英硫化物阶段的块状铅锌矿石,硫化物矿物包括共生矿物组合闪锌矿与方铅矿、黄铁矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿以及单矿物闪锌矿等(表 1),均为钻孔中的岩芯样品。测试样品以方铅矿、闪锌矿为主(图 4),并常见与黄铁矿、黄铜矿等共生,含少量团块状方解石和石英。镜下观察,矿石主要由半自形-他形的中粗粒闪锌矿构成,颜色有红棕色、浅黄褐色、黄褐色等,闪锌矿与方铅矿、黄铜矿等硫化物共生。闪锌矿部分被方解石脉穿切,部分可见闪锌矿和方解石共生,表明方解石有 2 个阶段:石英硫化物阶段的方解石和硫化物同时产出,而碳酸盐阶段则是后期矿化比较少或基本没有矿化的热液逐渐冷却形成。测试样品涵盖了主成矿阶段的各种矿石类型,被测试矿物均来自原生硫化物。

将样品粉碎至 40~80 目,在双目镜下挑选出单矿物,纯度达 99% 以上,用蒸馏水清洗,低温蒸干,然后将纯净的单矿物样品在玛瑙研钵内研磨至 200 目

左右待测。由于闪锌矿等金属矿物的 Rb、Sr 含量较低,甚至低于 0.01×10^{-6} ,为了 Rb-Sr 同位素定年的可行性,笔者在中国科学院土壤研究所对样品进行了微量元素 Rb、Sr 含量的草测,并从中挑选适合定年的样品在南京大学现代分析中心同位素分析室进行 Rb、Sr 含量和同位素组成测定。具体分析方法如下:

原粉末样品用混合酸溶解,取清液上离子交换柱分离,采用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离和提纯,然后用英国产的 VG354 质谱仪测定,测定方法见文献(方维萱等,2002;王银喜等,2007)。用于测定的美国 NBS987 同位素标样为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (0.710\,236 \pm 7)$,Sr 的全流程空白为 $5 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-9} \text{ g}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行标准化。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的分析误差为 $\pm 1\%$, $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。等时线年龄用 ISOPLLOT (Version 2.90,1994)程序计算。

4 测试结果

单矿物闪锌矿、方铅矿和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿、方铅矿与闪锌矿、闪锌矿与黄铁矿的 Rb、Sr 含量和同位素组成测定结果见表 2。本次测试样品 12 个,其中 8 个闪锌矿,3 个方铅矿,1 个黄铁矿。方铅矿和黄铁矿为单矿物闪锌矿的共生矿物,通过对单矿物以及共生矿物间不同的矿物组合来构筑等时线,这样单矿物和共生矿物的等时线年龄可以相互约束,从而提高等时线的精确度,得出比较精确的成矿年龄。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图(图 5、图 6、图 7、图 8、图 9),均表现出很好的线性关系。

表 1 取样位置及样品简要特征

Table 1 Locations and characteristics of samples from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit for Rb-Sr isotopic dating

编号	取样位置	样品描述
T-32	CK166-1(132 m)	闪锌矿呈块状产于矽卡岩化大理岩
T-94	CK166-1(280 m)	闪锌矿呈块状产于矽卡岩
T-103	CK166-1(322 m)	方铅矿呈块状产出在矽卡岩中
T-111	CK166-1(358 m)	闪锌矿呈团块状产于硅灰石矽卡岩中
TI-11	CK34-1(136 m)	块状矿石,黄铁矿和闪锌矿共生产出
TI-13	CK134-1(177 m)	方铅矿、闪锌矿呈块状产于矽卡岩化大理岩
T2-1	CK165-1(76 m)	闪锌矿以块状产出在透辉石矽卡岩中
T7-2	CK256-1(124 m)	闪锌矿产出于矽卡岩化大理岩中
T7-4	CK256-1(156 m)	方铅矿和闪锌矿共生并产于矽卡岩化大理岩中

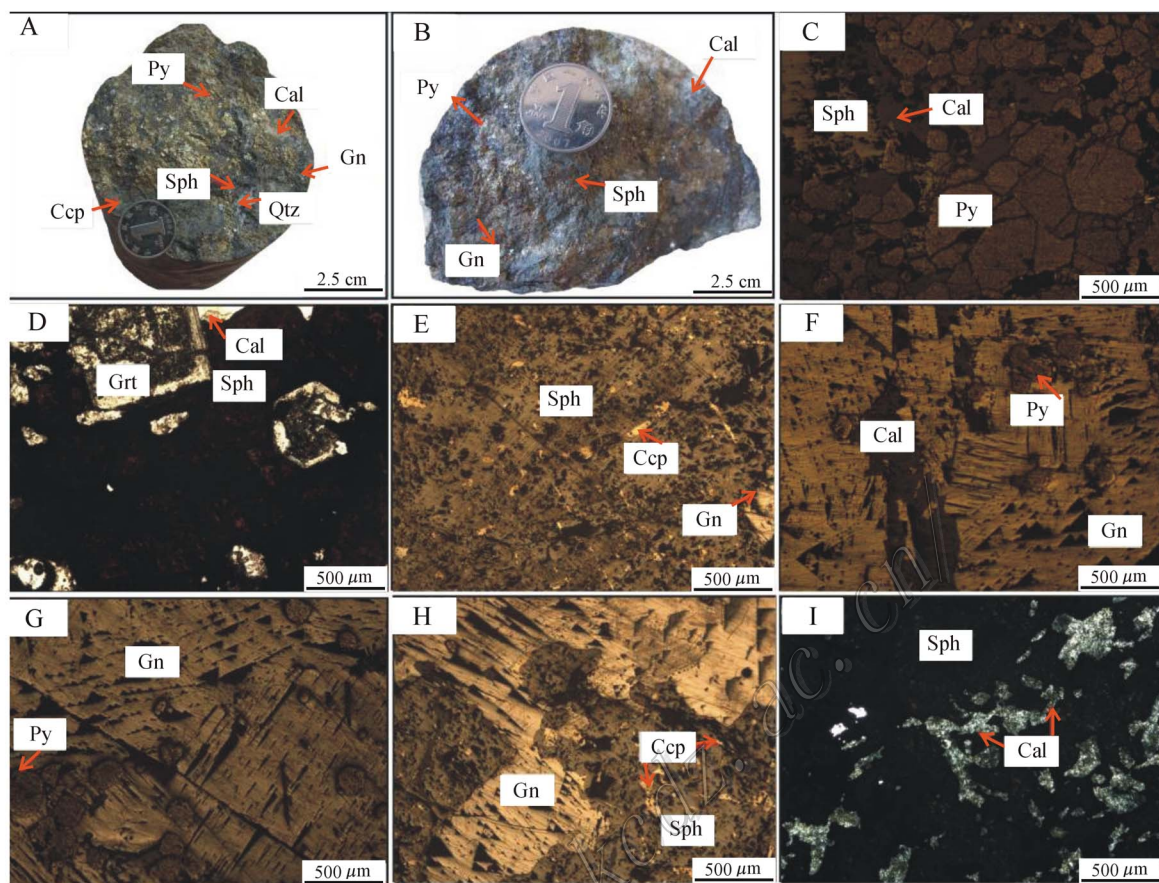


图 4 天堂铜铅锌多金属矿床主要矿石矿物样品特征

△. 块状矿石, 方铅矿(Gn)、闪锌矿(Sph)、黄铁矿(Py)和黄铜矿(Ccp)共生产出, 含少量团块状石英(Qtz)和方解石(Cal); B. 块状矿石, 含微量团块状及细脉方解石(Cal); C. 闪锌矿(Sph)和黄铁矿(Py)共生, 黄铁矿呈半自形、他形, 被细的方解石(Cal)脉穿切(反射光); D. 棕色闪锌矿(Sph)产于矽卡岩中, 可见比较自形的粒状石榴子石(Grt), 并含少量方解石(Cal)(单偏光); E. 闪锌矿(Sph)与黄铜矿(Ccp)形成固溶体分离结构(反射光); F. 方铅矿(Gn)和黄铁矿(Py)共生, 而方铅矿(Gn)被后期热液方解石(Cal)脉穿切(反射光); G. 较自形的粒状黄铁矿(Py)与方铅矿(Gn)共生, 并镶嵌在方铅矿(Gn)大颗粒间(反射光); H. 方铅矿(Gn)、黄铜矿(Ccp)和闪锌矿(Sph)共生, 闪锌矿交代方铅矿, 黄铜矿(Ccp)与闪锌矿(Sph)形成固溶体分离结构(反射光); I. 闪锌矿(Sph)与方解石(Cal)共生, 均呈他形(单偏光)

Sph—闪锌矿; Gn—方铅矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Cal—方解石; Grt—石榴子石

Fig. 4 Characteristics of ore mineral samples of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

△. Massive ore, galena and sphalerite associated with pyrite and chalcopyrite, containing a little lumpy quartz and calcite; B. Massive ore, containing a little lumpy and veinlet calcite; C. Sphalerite associated with pyrite, veinlet calcite cutting through anhedral-subhedral pyrite (under reflective light); D. Brown sphalerite existent in skarn, containing euhedral granular garnet and a little calcite (plainlight); E. Chalcopyrite and sphalerite assuming interstitial separation structure (under reflective light); F. Galena associated with pyrite; late hydrothermal vein of calcite cutting through galena (under reflective light); G. Galena associated with euhedral and granular pyrite and filling in large particles of galena (under reflective light); H. Galena associated with chalcopyrite and sphalerite, sphalerite replacing galena, chalcopyrite and sphalerite assuming interstitial separation structure (under reflective light); I. Sphalerite associated with calcite and assuming anhedral structure (plainlight)

Sph—Sphalerite; Gn—Galena; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Cal—Calcite; Grt—Garnet

利用 ISOPLOT 软件包计算出单矿物闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (98.1 \pm 1.6) \text{ Ma}$, 初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}} = 0.71180$ (MSWD = 1.4) (图 5); 共生矿物组合闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (99 \pm 2) \text{ Ma}$, 初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}} = 0.71176$ (MSWD =

1.6) (图 6); 共生矿物组合黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (98.6 \pm 4.2) \text{ Ma}$, 初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}} = 0.71168$ (MSWD = 2.5) (图 7); 共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (97.87 \pm 0.96) \text{ Ma}$, 初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}} = 0.711812$ (MSWD = 1.2) (图

表 2 天堂铜铅锌多金属矿床闪锌矿、方铅矿和黄铁矿 Rb-Sr 同位素组成

Table 2 Rb-Sr isotopic analyses of sphalerite, galena and pyrite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样品号	测试矿物	$\omega(\text{Rb})/10^{-6}$	$\omega(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$(1/\text{Rb})/10^{-6}$	$(1/\text{Sr})/10^{-6}$
T-32	闪锌矿	1.937	11.45	0.4998	0.712582 ± 9	0.71188	0.516262261	0.087336245
T-94	闪锌矿	4.028	3.503	4.015	0.717229 ± 11	0.71164	0.248262165	0.285469597
T-111	闪锌矿	5.839	10.72	1.626	0.714018 ± 8	0.71175	0.171262202	0.093283582
T1-11	闪锌矿	3.873	5.618	2.259	0.714921 ± 9	0.71178	0.258197779	0.177999288
T1-13	方铅矿	2.845	2.391	3.354	0.716693 ± 10	0.71202	0.351493849	0.418235048
T2-1	闪锌矿	0.8236	24.03	0.1028	0.711905 ± 12	0.71176	1.214181642	0.041614648
T7-2	闪锌矿	2.724	1.125	7.521	0.722236 ± 9	0.71176	0.367107195	0.888888889
T7-4	闪锌矿	3.961	1.209	9.814	0.725521 ± 11	0.71185	0.2524615	0.827129859
T1-13	闪锌矿	10.43	3.707	8.306	0.723464 ± 12	0.71190	0.095877277	0.269759914
T7-4	方铅矿	4.826	5.139	2.745	0.715366 ± 9	0.71154	0.207210941	0.194590387
T-103	方铅矿	0.9653	3.892	0.7286	0.712768 ± 10	0.71175	1.035947374	0.256937307
T1-11	黄铁矿	9.782	1.801	16.14	0.734239 ± 11	0.71176	0.102228583	0.555247085

测试单位：南京大学现代分析中心同位素分析室。

8) 共生矿物组合闪锌矿、方铅矿和黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (98.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$ ，初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}} = 0.71177 (\text{MSWD} = 1.5)$ (图 9)。

5 讨论

5.1 成矿年龄的可靠性

李志昌等(1994)认为,有色金属矿床中共生矿物可能更满足等时线的条件,因为地壳中流体的运移可以使成矿溶液中 Sr 同位素的初始组成趋向均一化,也可能由于成矿条件的变化和矿物晶体化学性质的差异会引起 Rb-Sr 体系发生强烈的分馏作用。

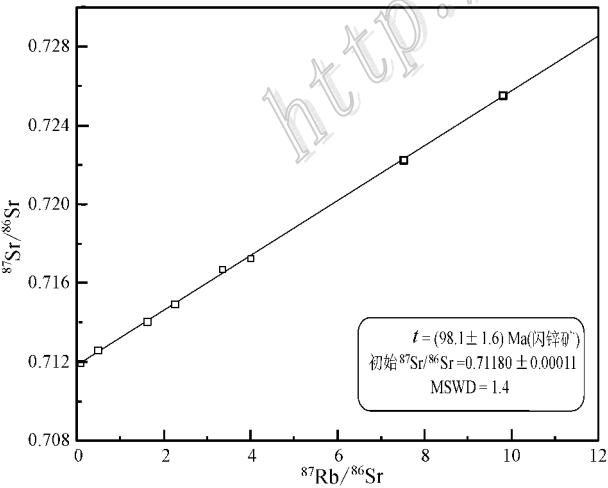


图 5 天堂铜铅锌多金属矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线图

Fig. 5 Rb-Sr isochron diagram of sphalerite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

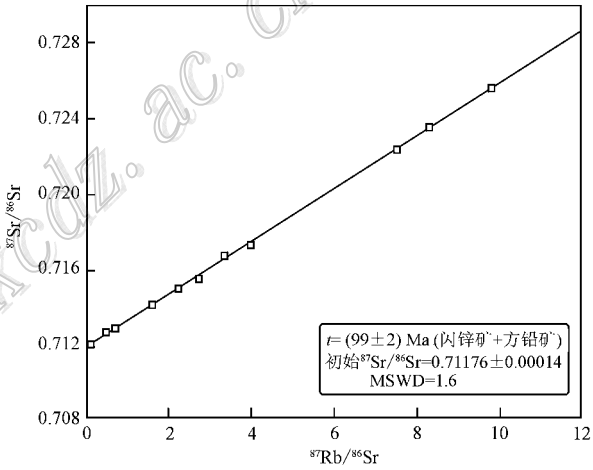


图 6 天堂铜铅锌多金属矿床共生矿物组合闪锌矿和方铅矿 Rb-Sr 等时线图

Fig. 6 Rb-Sr isochron diagram of the intergrown mineral association of sphalerite and galena from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

刘建明等(1998a ;1998b)同样指出,利用热液矿物组合等时线测定热液矿床的成矿时代会比较理想,因为不同矿物相具有不同的化学势,而化学性质不同的矿物 Rb 和 Sr 会发生化学分异,从而使同一成矿母液中沉淀出的共生矿物具有不同的 Rb/Sr 比值。通过共生矿物确定成矿时代的成功实例也非常多,李文博等(2004)利用 2 组共生矿物组合的 Rb-Sr 等时线,获得会泽超大型铅锌矿床成矿时代为 $(225.1 \pm 2.9) \text{ Ma}$ 和 $(225.9 \pm 3.1) \text{ Ma}$;李志昌等(1994)获得云南易门东川式铜矿床中共生黄铜矿-斑铜矿 Rb-Sr 年龄为 $(846 \pm 26) \text{ Ma}$;田世洪等(2009)获得东莫

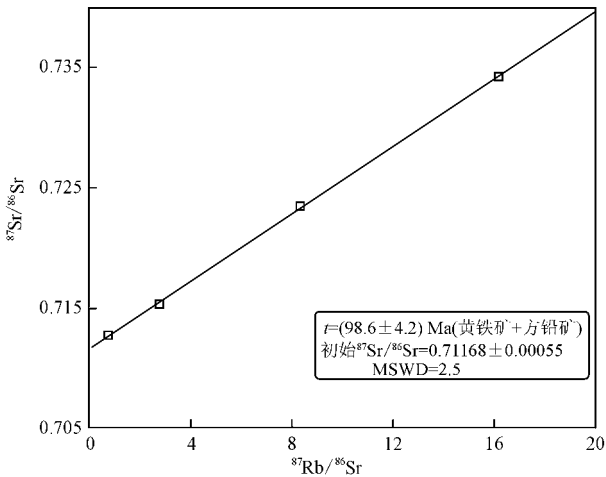


图 7 天堂铜铅锌多金属矿床共生矿物组合方铅矿和黄铁矿 Rb-Sr 等时线图解

Fig. 7 Rb-Sr isochron diagram of the intergrown mineral association of galena and pyrite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

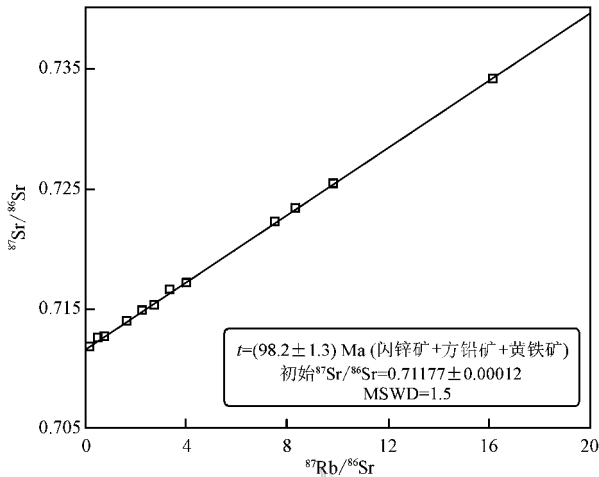


图 9 天堂铜铅锌多金属矿床共生矿物组合闪锌矿、方铅矿和黄铁矿 Rb-Sr 等时线图解

Fig. 9 Rb-Sr isochron diagram of the intergrown mineral association of sphalerite, galena and pyrite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

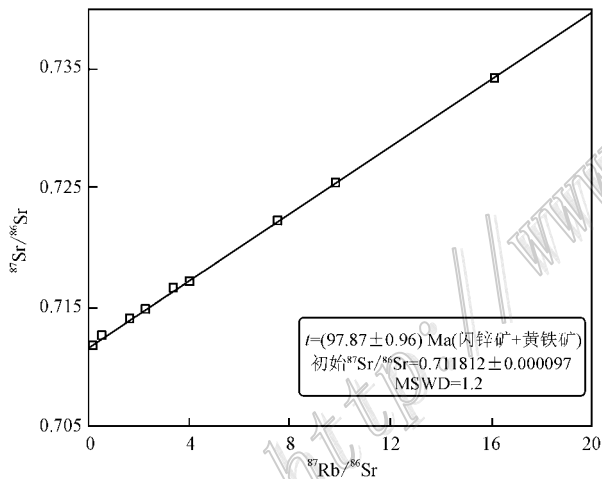


图 8 天堂铜铅锌多金属矿床共生矿物组合闪锌矿和黄铁矿 Rb-Sr 等时线图解

Fig. 8 Rb-Sr isochron diagram of the intergrown mineral association of sphalerite and pyrite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

扎抓铅锌矿床的共生矿物黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 年龄 $[(34.747 \pm 0.015) \text{ Ma}]$ 、闪锌矿与黄铁矿的 Sm-Nd 年龄 $[(35.74 \pm 0.71) \text{ Ma}]$ 以及莫海拉亨铅锌矿床的共生闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 年龄 $[(33.949 \pm 0.022) \text{ Ma}]$ 和萤石与方解石的 Sm-Nd 年龄 $[(33.72 \pm 0.46) \text{ Ma}]$,并得出 2 个矿床为同期同源成矿作用的产物。可以看出,利用共生矿物组合 Rb-Sr 法来

厘定矿床成矿时代是比较理想的,通过对共生热液矿物开展 Rb-Sr 等时线定年,不仅符合 Rb-Sr 等时线定年的基本前提,而且提高了 Rb-Sr 等时线的精确度。通过利用单矿物闪锌矿、方铅矿以及共生矿物组合黄铁矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿、闪锌矿与方铅矿,进行 Rb-Sr 等时线年龄测定,这样可以对成矿时代有更严格的约束意义,使所获得的数据更为可信。

5.2 成矿时代

热液矿物 Rb-Sr 等时线测年的基本前提是同源、同时、封闭性、一致的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 以及具有不同的 $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_i$ (李文博等,2002)。对于中低温铅锌矿床,矿物中原生包裹体与次生包裹体均一温度差别较小,给包裹体分离带来了困难(张长青等,2008)。测试过程中,将闪锌矿粉碎至 200 目以下后,进行超声波清洗,基本上可排除次生及原生包裹体的干扰(刘建明等,1998c)。热液矿床形成的时间一般为数百万年,而一组热液共生矿物的生成时限往往只有数十万年,因此,对于不同矿物的 Rb-Sr 等时线定年可视为基本上同时形成(刘建明等,1998c)。本次工作选择未见或少见裂隙,且结晶较好的致密块状矿石矿物为研究对象,这样闪锌矿、方铅矿等单矿物以及共生矿物纯度相对比较高,最大程度满足了 Rb-Sr 同位素测年的前提条件。

李文博等(2002)提出,可利用 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图和

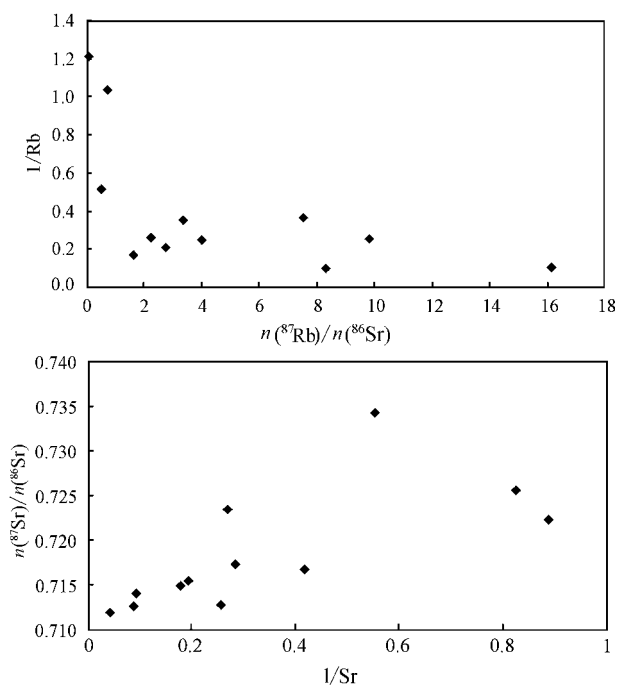


图 10 天堂铜铅锌多金属矿床闪锌矿及其共生矿物黄铁矿和方铅矿 $1/\text{Rb}-n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 和 $1/\text{Sr}-n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 关系图

Fig. 10 Diagrams of $1/\text{Rb}$ versus $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ and $1/\text{Sr}$ versus $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ of sphalerites and the intergrown mineral association of pyrite and galena from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

$1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图判别闪锌矿生长期间 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值是否保持不变,进而判别所测数据的合理性。本次测试结果显示在 $1/\text{Rb}-n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 和 $1/\text{Sr}-n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 关系图解(图 10)中,同时投出石英硫化物阶段的单矿物闪锌矿及其共生矿物方铅矿、黄铁矿等的 Rb、Sr 含量不同, $1/\text{Sr}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $1/\text{Rb}$ 与 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 之间不存在线性关系,而且相对稳定,说明闪锌矿及其共生矿物生长期间初始值基本上保持不变,因此,可以认为图 5、图 6、图 7、图 8、图 9,这 5 条直线具有等时线意义。

从图 5、图 6、图 7、图 8、图 9 中可以看出,几乎所有的样点都落在等时线上,说明矿石矿物形成过程中 Sr 同位素是均一的,而且得到了很好的封闭,因此拟合的等时线年龄具有很高的精度。单矿物闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (98.1 \pm 1.6) \text{ Ma}$ 共生矿物组合闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (99 \pm 2) \text{ Ma}$ 共生矿物组合黄铁矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (98.6 \pm 4.2) \text{ Ma}$ 共生矿物组合闪锌矿与黄

铁矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (97.87 \pm 0.96) \text{ Ma}$ 共生矿物组合闪锌矿、方铅矿和黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄 $t = (98.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$ 。显示单矿物闪锌矿和共生矿物组合黄铁矿与方铅矿或者闪锌矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿等的形成时代在误差范围内是基本一致的,获得的年龄非常相近,变化在 $97.87 \sim 100 \text{ Ma}$ 之间,这一方法以闪锌矿、方铅矿等共生矿物组合为直接定年对象,获得了比较精确的成矿年龄。袁正新(1995)通过 K-Ar 法获得成岩年龄为 111 Ma ,由于前人测试方法所限,该年龄与本次所测成矿年龄在误差范围内基本一致,进一步验证了成矿年龄的准确性和可行性。

5.3 成矿物质来源

天堂矿区硫化物锶同位素的测试结果(表 2)显示,硫化物的 $w(\text{Rb})$ 较低,范围为 $0.8236 \times 10^{-6} \sim 10.43 \times 10^{-6}$, $w(\text{Sr})$ 变化相对较大,范围为 $1.125 \times 10^{-6} \sim 24.03 \times 10^{-6}$ 。同位素 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较大,为 $0.1028 \sim 16.14$,平均值 4.759 , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化相对较小,为 $0.7119 \sim 0.7343$,平均值 0.718 。

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 是判断成岩成矿物质来源的重要指标,在矿床地质研究中,常利用其来示踪成矿物质来源、岩浆流体、深源流体的壳幔混染作用(侯明兰等, 2006)。为避免放射性 ^{87}Rb 衰变对锶同位素造成显著影响,将成矿时代换算到 98 Ma ,采用软件 Geokit(路远发, 2004)分别对硫化物进行了初始同位素计算(表 2)。从表 2 可以看出,天堂矿床硫化物等时线年龄给出的初始同位素比值非常接近,且比值相对较高,介于 $0.71154 \sim 0.71202$ 之间,平均值 0.7117 ,小于大陆地壳锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 0.719 (孙省利, 2001),而高于地幔 Sr 的初始值 0.707 (Faure, 1986),显示硫化物的成矿物质来源为壳幔混合。这与笔者研究该矿床 S、Pb 同位素的地球化学特征(郑伟等, 2012)得出的结论完全一样,更进一步说明该矿床的成矿物质来源于壳幔混合。

5.4 地质意义

在地壳演化过程中,成矿过程总受到一个特定区域内的重要构造-热事件或其他异常地质事件的影响和制约(周涛发等, 2000; 杨竹森等, 2002; 曾普胜等, 2002; 毛景文等, 2004a; 王彦斌等, 2004)。中生代时期,中国东部发生了岩石圈-软流圈系统的大灾变,出现了火山-岩浆-成矿大爆发(邓晋福等, 1999; 陶奎元等, 1999; 毛景文等, 2000)。毛景文等(2004b; 2005; 2007; 2008)、舒良树等(2006)、王彬等

(2006)和董树文等(2007)都认为 175 Ma 左右,中国东部包括华南地区在内开始从特提斯体制向太平洋体制转变。毛景文等(2004b)认为,华南地区大规模成矿作用主要发生在 170~150 Ma、140~125 Ma、110~80 Ma 三个时间段。175 Ma 左右伊泽奈奇板块由 SE 向 NW 斜向俯冲,中国东部大陆边缘成为活动大陆边缘,遂沿着钦杭古板块焊接带发生俯冲,形成埃达克质岩浆或高钾钙碱质岩浆,岩浆侵位进而形成多金属矿床,其成岩成矿时间大约在 175~155 Ma 之间(毛景文等,2007),即处于华南地区中生代三次成矿高峰(毛景文等,2004b;2007;2008;华仁民等,2005)之一的中晚侏罗世。但以冷水坑为代表的一批铅锌银矿和铜铅铅锌银矿及冶岭头浅成低温热液型金矿形成时代为 151~135 Ma (毛景文等,2011),这一成岩成矿事件在时间上与长江中下游铜多金属成矿带中的斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-Au-Fe 矿床系统相吻合(毛景文等,2004a),表明钦杭结合带的最东端可能在 151~135 Ma 发生过一次伸展过程,并伴随有第四期的成岩成矿事件。135 Ma 之后,太平洋板块运动方向发生转向(毛景文等,2007;2008;2009;Mao et al., 2008a;2008b),使得中国大陆处于持续伸展阶段(Goldfarb et al., 2007)。这一期成矿作用在钦杭带仅仅出现在云开-大瑶山地区,矿化强度大,矿床类型多,绝大多数矿床分布在盆地及其周缘,阳春盆地便是其中的典型代表,如赋存于盆地中的鹦鹉岭中型锡钨铜铅锌多金属矿床、黑石岗中型铅锌硫矿床、石蓼大型铜矿床(伴生中型银矿)、崩坑中型铅锌硫矿床(伴生小型银矿)、茶地中型铅锌矿床、芒鹅岭中型铁铜矿床、高基和银坑坦小型铅锌矿床等。事实上,阳春盆地所在的粤西-桂东南地区白垩纪矿化也属于中国东部大陆边缘成矿的一部分,可能由于古钦杭结合带断裂和构造等比较发育,壳幔相互作用强烈,故在 110~80 Ma 区内成岩成矿强度大、矿种多、矿床类型丰富。石蓼大型矽卡岩型铜铅矿床的成矿岩体 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 (107.00 ± 0.72) Ma (赵海杰等未发表资料),辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (104.1 ± 1.3) Ma (赵海杰等,2012) 鹦鹉岭中型斑岩-矽卡岩型锡钨铜铅锌多金属矿床的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (83.0 ± 1.7) Ma (郑伟等,未发表资料)。S 和 Pb 同位素研究(郑伟等,2012),结合本次 Sr 同位素结果,表明天堂铜铅锌多金属矿床的成矿物质来源为多源,属于典型的壳幔混合型,与区域上大的成矿作用、成矿物

质来源相吻合。本文的闪锌矿及其共生矿物组合黄铁矿与闪锌矿、黄铁矿与方铅矿、方铅矿与闪锌矿等 Rb-Sr 同位素定年结果表明,天堂铜铅锌多金属矿床的成矿时代大约为 98 Ma,即形成于晚白垩世早期,与燕山晚期云开地区乃至华南地区的成岩成矿作用相对应,为天堂铜铅锌多金属矿床的成矿时代和成矿背景提供了新的可靠证据。

6 结 论

(1) 云开地区天堂铜铅锌多金属矿床石英硫化物阶段的闪锌矿单矿物及其共生矿物组合 Rb-Sr 等时线年龄均为 98 Ma 左右,指示其成矿时代为晚白垩世早期。

(2) 闪锌矿及其共生矿物黄铁矿、方铅矿的 Sr 同位素初始比值非常接近,且比值相对较高,介于 0.711 54~0.712 02,平均值 0.7117,指示成矿物质可能来源于壳幔混合源区,与 S、Pb 同位素地球化学特征的结论相吻合。

(3) 该年龄对于整个阳春盆地甚至云开地区的同类铅锌矿床成矿时代具有一定的约束意义,可能与 135 Ma 之后太平洋板块运动方向发生转向,中国大陆包括华南板块在内处于持续伸展的作用有关,是钦-杭成矿带燕山晚期强烈的构造-岩浆-成矿作用的产物。

志 谢 本文完成过程中得到了毛景文研究员、武广研究员、张长青研究员的指导,野外地质工作期间,得到了广东省地质调查院、广东省有色金属地质局和云浮星辰矿业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王银喜教授在实验过程中给予了指导和帮助,资料收集过程中得到中国地质大学(北京)张东阳、孟芳、胡乔青、余长发、张娟、王志华的帮助,审稿专家提出了许多建设性的意见,在此一并感谢!

参考文献/References

- 陈毓川,王平安,秦克令,赵东宏,毛景文. 1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列划分及区域成矿规律探讨[J]. 矿床地质, 13(4):289-298.
- 程裕淇. 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 第6号:1-64.

- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲. 1999. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 18(4): 209-315.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 胡建民, 陈宣化. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 81(11): 1449-1461.
- 方维萱, 胡瑞忠, 苏文超, 肖加飞, 蒋国豪, 漆亮. 2002. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代[J]. 科学通报, 47(4): 307-312.
- 广东省 704 地质队. 2011. 天堂多金属矿内部详查报告[R]. 内部资料.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 24(2): 99-107.
- 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.
- 胡开明. 2001. 江绍断裂带的构造演化初探[J]. 浙江地质, 17(2): 1-11.
- 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.
- 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: 112-116.
- 李志昌, 蔡红, 朱家平. 1994. 矿石、沉积岩年龄的直接测定[J]. 地质地球化学, (1): 47-52.
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998a. 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): 46-45.
- 刘建明, 沈洁, 赵善仁, 霍卫国, 姜能. 1998b. 金属矿床同位素精确定年的方法和意义[J]. 有色金属矿产与勘查, 7(2): 107-113.
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998c. 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): 46-55.
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459-464.
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨[J]. 矿床地质, 19(4): 289-296.
- 毛景文, Stein H, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 藏文栓, 李进文. 2004a. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1): 121-131.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004b. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 11(1): 45-55.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169-188.
- 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 王义天. 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社. 58-70.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329-2338.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14: 510-526.
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 陈毓川. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 55(3): 347-354.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 85(5): 636-658.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钨矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81(7): 898-905.
- 裴荣富, 吴良士. 1993. 金属成矿省的地质历史演化和成矿年代学研究新进展[J]. 矿床地质, 12(3): 285-286.
- 裴荣富, 吴良士. 1994. 金属成矿省演化与成矿[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 1(3-4): 95-99.
- 彭松柏, 金振民, 付建明, 刘云华, 何龙清, 蔡明海. 2006. 两广云开隆起区基性侵入岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 25(4): 434-441.
- 沈睿文, 海涛, 刘昌明. 2010. 广东阳春盆地多金属找矿潜力浅析[J]. 地质与勘探(增刊), 46: 1249-1255.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起. 2006. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 52(2): 251-265.
- 孙省利. 2001. 西秦岭泥盆系西成矿化集中区烃碱流体成矿系列研究(博士论文)[D]. 导师: 曾允孚, 何知礼. 成都: 成都理工学院. 43-44.
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福. 1999. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发[J]. 矿床地质, 18(4): 316-322.
- 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. 玉树地区东莫扎扒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.
- 王彬, 舒良树, 杨振宇. 2006. 赣闽粤地区早、中侏罗世构造地层研究[J]. 地层学杂志, 30(1): 42-49.
- 王联魁, 覃慕陶, 刘师先, 黄智龙, 李富才. 2001. 吴川-四会断裂带铜金矿控矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社. 32-74.
- 王彦斌, 唐索寒, 王进辉, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004. 安徽铜陵新桥铜金矿床黄铁矿 Rb-Sr 同位素年龄数据[J]. 地质论评, 50(5): 538-542.
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 23(7): 1749-1755.

- 袁正新. 1995. 粤西及其邻区的区域构造对金(银)成矿作用的控制 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 29-38.
- 杨竹森, 侯增谦, 蒙义峰, 王训诚, 曾普胜, 田世洪, 姜章平, 姚孝德. 2002. 安徽铜陵矿集区流体系统与成矿 [J]. 矿床地质, 21 (增刊): 1080-1083.
- 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 蒙义峰, 杨竹森, 王训诚, 田世洪, 徐文艺, 姜章平. 2002. 安徽铜陵地块沉积-喷流块状硫化物矿床 [J]. 矿床地质, 21 (增刊): 532-535.
- 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.
- 赵海杰, 郑 伟, 余长发, 胡耀国, 田 云. 2012. 粤西石炭铜钼矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义 [J]. 中国地质, 39 (6), 1604-1613.
- 赵子杰, 马大铨, 林惠坤, 张小豪. 1985. 广东阳春地区两类花岗岩类的铷-锶、氧同位素组成及其成因探讨 [J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 第 10 号: 89-98.
- 郑 伟, 陈懋弘, 赵海杰, 郝宏达, 罗大略, 胡耀国, 赵辛敏. 2012. 广东天堂铜铅锌多金属矿床矿物学、硫化物 S-Pb 同位素特征 [J]. 中国地质, 39 (6): 1838-1854.
- 周永章, 曾长育, 李红中, 安燕飞, 梁 锦, 吕文超, 杨志军, 何俊国, 沈文杰. 2012. 钦州湾-杭州湾构造结合带(南段)地质演化 and 找矿方向 [J]. 地质通报, 31 (2-3): 486-491.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全. 1992. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究 [J]. 矿床地质, 11 (1): 1-12.
- 翟裕生, 邓 军, 李晓波. 1999. 区域成矿学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 122-125.
- 翟裕生, 王建平, 邓 军, 彭润民, 刘家军. 2008. 成矿系统时空演化及其找矿意义 [J]. 现代地质, 22 (2): 143-150.
- 周涛发, 岳书仓. 2000. 长江中下游铜、金矿床成矿流体系统的形成条件及机理 [J]. 北京大学学报, 36 (5): 697-707.
- Barra F, Ruiz J, Mathur R and Titley S. 2002. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA [J]. Mineralium Deposita, 38 (5): 585-596.
- Brannon J C, Podosek F A and McLimans 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 McLimans 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.
- 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]. John Wiley Sons (2nd edition), 183-199.
- FoLand K A, Chen J F and Linder J S. 1989. High-resolution ^{40}Ar - ^{39}Ar chronology of multiple intrusion igneous complexes: Application to the Cretaceous Mount Bromé Complex, Quebec [J]. Canada Contrib Mineral Petrol, 127-137.
- Goldfarb R J, Hart C, Davis G and Geoves D. 2007. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons [J]. Econ. Geol., 102 (3): 341-345.
- Lanphere M A and Dalrymple G B. 1971. A test of the ^{40}Ar - ^{39}Ar age spectrum technique on some terrestrial materials [J]. Earth Planet Sci. Lett, 12: 359-372.
- Leach D L, Bradley D C, Lewchuk M, Symons D T A, Brannon J and Marsily G. 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: Implications from recent age-dating research [J]. Mineralium Deposita, 36: 711-740.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gutzmer J and Walters S. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective [J]. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J and Richards J P, eds. Econ. Geol., 100th Anniversary Volume, 561-607.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Rhenium-osmium isotopic dating of molybdenite in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in North Qilian Mountains and its geological significance [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 63: 1815-1818.
- 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}Ar - ^{39}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. 2008a. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 72: 4607-4626.
- Mao J W, Wang Y T, Li H M, Pirajno F, Zhang C Q and Wang R T.

- 2008b. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula : Evidence from D-O-C-S isotope systematic [J]. *Ore Geology Reviews*, 33 :361-381.
- 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. 2008c. 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-type (MVT) ore deposit [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 isochrons : A clarification of why it works [J]. *Econ. Geol. and the Bulletin of the Society of Econ. Geol.*, 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, geology of Canada*, No. 8 [C]. Geological Survey of Canada, 253-261.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, Morgan J W and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittilakiviso, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania : Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting [J]. *Mineralium Deposita*, 33 (4) :329-345.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite : How and why it works [J]. *Terra Nova*, 13 :479-486.
- Walker D A and McDougall L. 1982. ^{40}Ar - ^{39}Ar and K-Ar dating of altered glassy volcanic rocks : The Dabi Volcanics [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46 :2182-2190.
- York D and Bergar G W. 1970. ^{40}Ar - ^{39}Ar age determinations on nepheline and basic whole rocks [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 7 :333-336.