

广东天堂铜铅锌多金属矿床矿物学、硫化物 S-Pb 同位素特征及地质意义

郑 伟¹ 陈懋弘² 赵海杰² 郝宏达¹ 罗大略³ 胡耀国³ 赵辛敏¹

(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. 广东省地质调查院, 广东 广州 510080)

摘要:广东天堂矽卡岩型铜铅锌多金属矿床位于钦州—杭州成矿带阳春盆地的东北端边缘。在野外地质观察的基础上,选取该矿床主要金属硫化物开展矿物学特征研究,测定 S、Pb 同位素组成,探讨其成矿物质来源。电子探针分析发现:黄铁矿中 Fe、S 含量和 S/Fe 原子比普遍高于理论值,存在一定量的 Cu、Sb、As、Co/Ni 比值变化范围为 0.21~2.28,一般大于 1,指示硫逸度较高的热液环境;闪锌矿中 Zn 含量比理论值稍低,S/Zn 原子比和 S 含量较理论值偏高,含一定量的 Pb、Fe、Co 和 Se 等元素;方铅矿、黄铜矿等硫化物元素间均有类质同象现象的发生。硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成范围比较窄,变化范围为 -2.1‰ ~ 2.6‰ ,多数集中在 -0.8‰ ~ 0.4‰ ,具有明显的塔式分布特征。矿石矿物 Pb 同位素组成亦比较稳定, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围分别为 38.765~39.137、15.523~15.751、18.450~18.667,矿石铅既具有下地壳或者上地幔的特征,又具有上地壳的特征,显示混合源特征,表明成矿物质属于壳幔混合型,具有多种物质来源,可能是晚中生代以来华南地区岩石圈伸展作用的产物。

关键词:同位素组成;矿物学特征;成矿物质来源;天堂铜铅锌多金属矿;钦州—杭州成矿带

中图分类号: P597; P618.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2012)06-1830-17

广东天堂矽卡岩型铜铅锌多金属矿床地处云开隆起南东边界吴川—四会断裂控制的阳春盆地的东北端边缘,位于钦州—杭州成矿带(简称钦杭带)内。云开地区位于钦杭成矿带西南段,它是一个以元古宙混合岩、混合花岗岩为核心的古隆起,构造—岩浆演化比较复杂,成矿条件优越,具有众多的大型—超大型矿床。在阳春盆地内,除了天堂铜铅锌矿床外,还发现了石藁大型铜矿床(伴生中型银矿)、黑石岗中型铅锌硫矿床、鸚鵡岭中型锡钨铜铅锌多金属矿床、崩坑中型铅锌硫矿床(伴生小型银矿)、芒鵝岭中型铁铜矿床、茶地中型铅锌矿床、高基和银坑坦小型铅锌矿等。早在 1966 年,广东省地质矿产局 723 队就曾对天堂多金属矿床做过详查工作,后来的科研和勘查工作使该矿储量又有比较大的突破。但是迄

今为止,对于该矿床的成矿机制、矿物学特征、成矿物质来源以及成矿地质背景的研究相对比较薄弱,广东省地勘局 704 地质队等报道了该区的成矿年龄为 94 Ma,但是未提及具体的测试方法;司徒宏等^[1]仅对该矿床的矿床地质特征进行了简单的描述。本文在前人工作的基础之上,对该矿床的主要硫化物开展了电子探针和 S、Pb 同位素分析,通过综合对比分析,对其成矿物质来源进行示踪,以期进一步讨论其成矿机制,为研究该区域的成矿作用以及找矿勘查等提供新的资料和依据。

1 区域地质背景

云开地区指位于两广交界的云开大山及其邻近地区,其范围一般以吴川—四会断裂带为东界,岑

收稿日期:2012-11-05;改回日期:2012-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(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)联合资助。

作者简介:郑伟,男,1988 年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail:zhengwei19880824@126.com。

通讯作者:赵海杰,女,1982 年生,助理研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail:zhaohaijie_610@163.com。

溪—博白断裂带为西界,北至罗定—广宁断裂带,南至吴川—遂溪断裂带(图 1)。

云开隆起区及其毗邻地区地层发育齐全,自元古宇至第四系均有出露,总厚度达 41 000 余米^[9]。而阳春盆地是云开隆起区一个在印支期复向斜基础上发育而成的局部断陷盆地,属于典型的构造盆地,具有过渡区边缘凹陷的一些构造和沉积特征^[9],面积大约 2 028 km²。盆地在新元古代末期至早古生代为地槽环境,沉积了从震旦系到寒武系巨厚的复理石、类复理石建造,构成了区内的基底,加里东期发生褶皱造山运动及区域变质作用,形成绿片岩相—角闪岩相变质岩,局部发生混合岩化,形成各种混合岩^[9]。盖层为上

古生界,泥盆系和石炭系分布广泛,包括老虎坳组、天子岭组和帽子峰组等。老虎坳组主要以石英砂岩、石英质砾岩为主;粉砂岩、页岩互层构成了帽子峰组的主体岩性,并夹有长石石英砂岩、细砂岩底部夹薄层泥灰岩等;天子岭组以结晶灰岩夹少量白云质灰岩为主,是盆地非常重要的赋矿层位。白云岩、灰岩等碳酸盐岩建造组成了石炭系的主要岩石地层。盖层的顶部零星分布侏罗纪陆相碎屑岩^[9]。

区域褶皱、断裂构造比较发育,主要构造线方向为北东至北北东向,属吴川—四会深大断裂代的中段,局部发育北西西—北西向、东西向和近南北向断裂。其中区域成矿作用与北北东—北东向断裂关系比

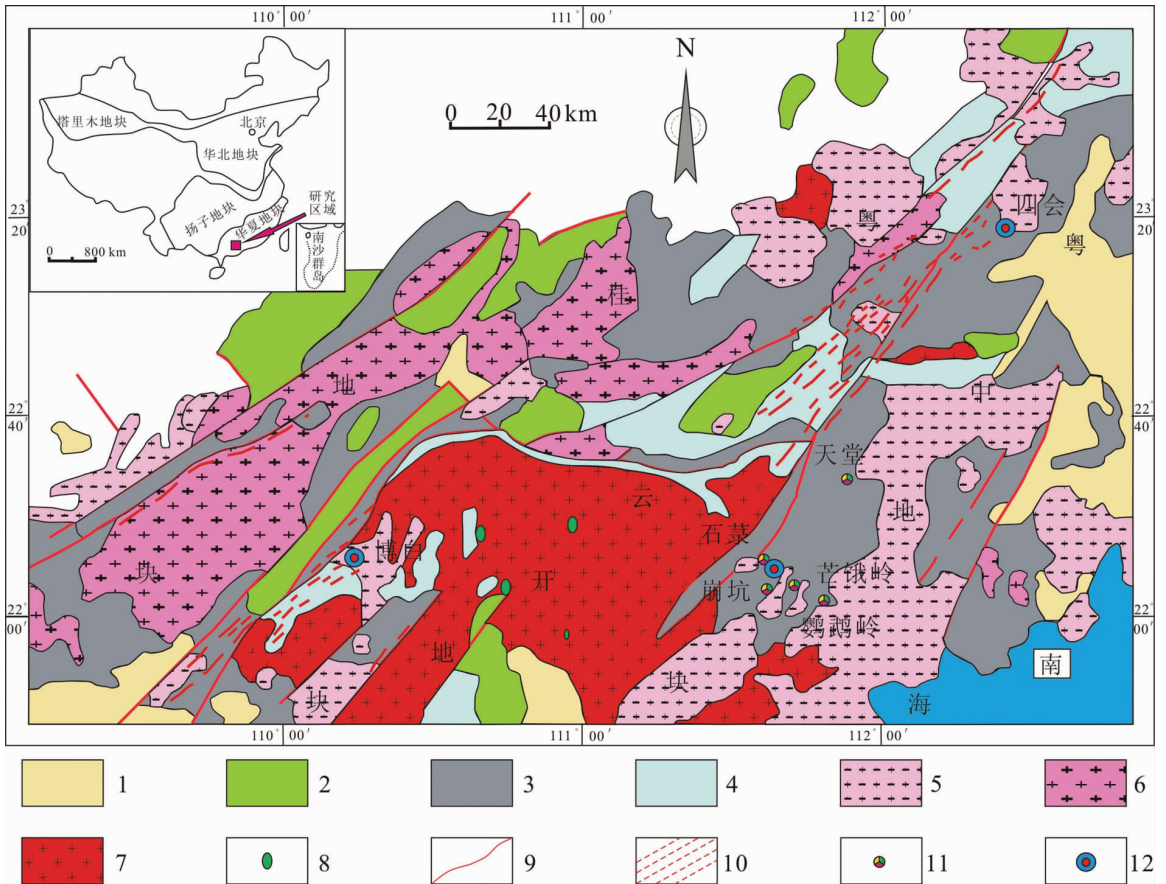


图 1 云开地区地质构造略图(改自彭松柏等^[9],2006)

1—新生界砂岩、粉砂岩、泥岩、砂砾岩、粘土;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—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—地点名

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

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

较密切,多组断裂的交汇部位可能最有利于成矿。

研究区内岩浆活动极为频繁,分布广泛,从加里东期至喜马拉雅期均有岩浆活动。其中最为重要的岩浆活动期是燕山期,不仅有重熔型酸性花岗岩,也有同熔型中酸性花岗质岩石岩,其中花岗岩类岩石广泛发育,约占盆地面积的10%^[7]。区内与燕山期岩浆活动有关的成矿作用不仅规模大、强度高,而且形成的矿种多,矿床类型复杂。到目前为止已发现36种矿产,已探明的有28个矿种,以Cu、Pb、Zn、Ag、W、Sn、Mo为主,Au、Fe、Bi相对比较少。矿床类型多样,包括矽卡岩型铜铅锌多金属矿床、热液充填石英脉型黑钨矿床、云英岩型黑钨矿多金属矿床、石英脉和破碎带充填型金矿、热液充填石英脉型锡矿以及少数接触交代矽卡岩型白钨矿床等^[9]。赵子杰等^[8]将区内花岗岩分为两类:与铁、铜、多金属有关的中酸性花岗岩类(岗尾—石英型)和与钨、锡、铌等有关的

正长花岗岩类(小南山—锡山型)。

2 矿床地质特征

天堂矿床地理坐标为:东经112°2'30",北纬22°35'5",是阳春地区重要的大型矽卡岩型多金属矿床(图2)。矿区出露的地层为泥盆系和第四系,泥盆系包括天子岭组、帽子峰组和老虎坳组,其中以天子岭组和帽子峰组分布最广,中统老虎坳组出露比较少。泥盆系各地层间均为连续沉积,整合接触关系。帽子峰组(D_{3m})在区内仅出露其底部,岩性以砂页岩互层为主,并夹有长石石英砂岩、绢云母石英细砂岩和钙质页岩(或泥灰岩)薄层。岩石中微层理、薄层状构造发育,粉砂岩分选性良好。天子岭组(D_{3t})由薄层状泥灰岩和灰岩透镜体(或夹层)所组成,两者呈整合产出。透镜体大小不一,长十几米至三百米、厚几米至数十米,薄层状泥灰岩为浅灰-青灰色,隐晶质

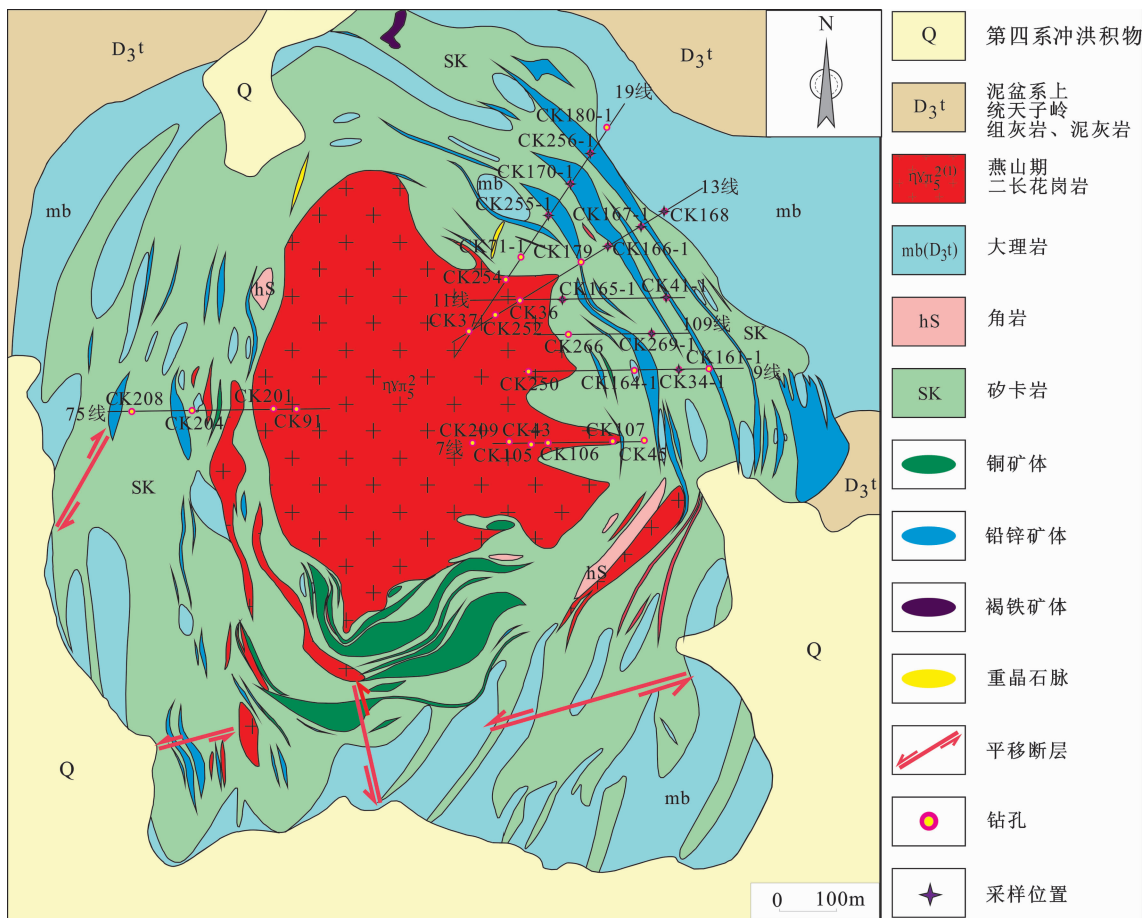


图2 天堂铜铅锌多金属矿床地质略图(改编自广东省704地质队,2011)

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

结构,薄层状、条带状构造,矿物成分以方解石为主,薄层状泥灰岩的矿物成分沿走向变化大,局部相变为粉砂质灰岩、钙质页岩和灰岩透镜体。天子岭组岩石为本矿区赋矿的主要围岩。

区域构造活动较强烈,主要表现为褶皱和断裂,断裂构造线方向主要为北东-北北东,北西-北西西两组,两组构造的复合交汇的部位为岩体侵位的主要通道及矿体赋存空间。

区域成矿与岩浆活动非常密切。与天堂铜铅锌矿床有关的花岗岩体出露在屋背岭一带,面积大约 0.34 km²,以岩舌状超覆围岩,边部则以岩枝插入围岩,形成一个产状上缓下陡的蘑菇状小岩株(图 3)。岩脉分布于矿区东部,它与围岩的接触界线不甚平直,并且厚度变化也比较大,常具分枝复合现象。二长花岗斑岩与围岩接触的部位,局部相变为花岗闪长岩。另据马大铨等^[9]报道,在屋背岭二长花岗斑岩中还发现有少量的石英二长岩包体。

天堂铜铅锌多金属矿床主要包括自东向西的一号铜矿带、二号铜铅锌矿带和西接触带。共计有 192 个矿体,其中主矿体 14 个:一号矿带分布于岩体东约 800 m 处,长约 1620 m,宽 60~90 m,呈北东向展布,带内共有 35 个矿体,2 个主要矿体分布于二长花岗斑岩脉两侧的矽卡岩中,呈似层状和透镜状产出,矿体沿走向连续性好,其中 7 线以南以铜为主,7 线以北以铅锌为主;二号矿带主要位于岩体之南面

和东面,带内有铅、锌矿体 97 个,铜矿体 43 个,自南向北呈北东-南北-北西走向延伸,两端分别与西接触带相连接,构成以岩体为中心的环状矽卡岩。当矿体产于靠近岩体部位的厚层矽卡岩中时,规模一般不大,而且纵横方向延伸短浅,形态复杂,多呈不规则状和透镜状;而当赋存在远离岩体部位的层间矽卡岩中时,矿体规模大而且连续性好,多呈透镜状、薄板状和似层状;西接触带长 809 m,宽 250~450 m,共有 17 个矿体,矿体呈似层状、透镜状和条带状产于屋背岭岩体内、外接触带的矽卡岩、断裂带、层间破碎带内以及岩性界面和不整合面上。

矿区内已发现 50 余种矿物,方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等为主要矿石矿物(图 4),伴生的金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿;脉石矿物有石榴子石、透辉石、绿帘石、硅灰石、绿泥石、符山石、方解石和石英等。矿石矿物方铅矿、闪锌矿等常具半自形-他形粒状、乳浊状、揉皱和溶蚀交代、固溶体分离结构等,矿石以团块状、稠密浸染状和稀疏浸染状、细脉状等构造为主。矿区内主要的围岩蚀变有绿帘石化、硅化、蛇纹石化、绿泥石化、黄铁矿化等,其中矽卡岩化与成矿关系最为密切。根据矿物组合及矿物成分,可将矿区内主要的矽卡岩分为石榴子石矽卡岩、硅灰石矽卡岩、透辉石石榴子石矽卡岩、硅灰石石榴子石矽卡岩等,其中最为常见的为石榴子石矽卡岩和石榴子石硅灰石矽卡岩。随着与岩体距离的变化,矽卡岩

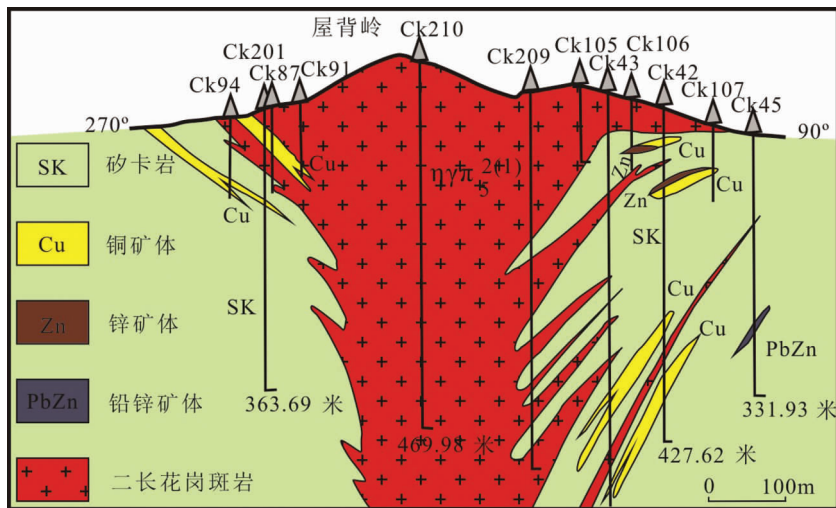


图 3 天堂矿区 75 线-7 线勘探线剖面地质图(据广东省 704 地质队,2011)

Fig.3 Geological section along No.75-7 exploration line of the Tiantang deposit (modified after No. 704 Geological Party of Guangdong Province, 2011)

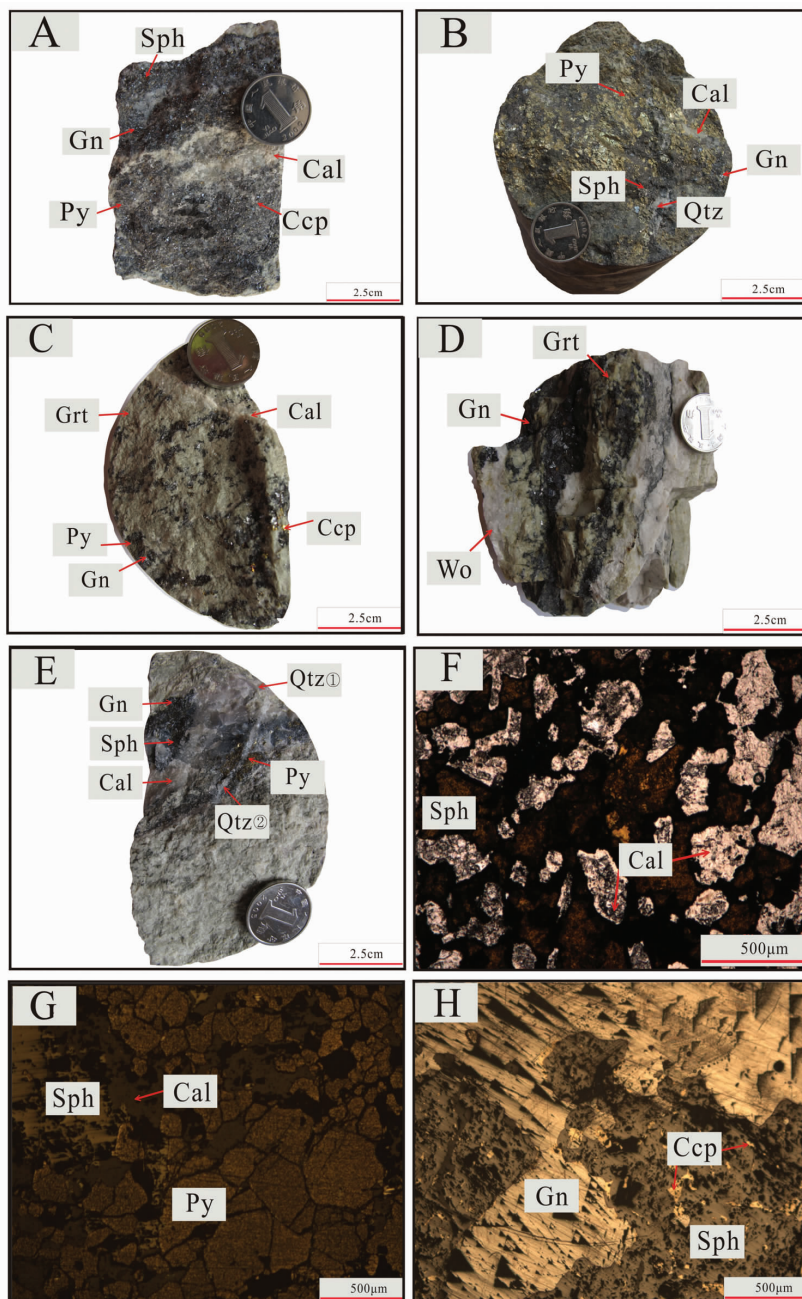


图 4 天堂铜铅锌多金属矿典型矿石类型及结构

A—黄铁矿 Py, 闪锌矿 Sph, 方铅矿 Gn 和黄铜矿 Ccp 在矽卡岩化大理岩中成粒状、团块状, 含团块状方解石 (Cal); B—块状矿石, 含少量团块状和细的方解石 (Cal) 脉; C—黄铁矿 (Py), 黄铜矿 (Ccp) 和方铅矿 (Gn) 以粒状、细脉状产出在石榴子石矽卡岩中, 石榴子石矽卡岩被后期热液方解石 (Cal) 脉穿切; D—方铅矿 (Gn) 以脉状产出在硅灰石石榴子石矽卡岩中, 石榴子石 (Grt) 比较自形, 粒状; E—矽卡岩化大理岩, 被两期热液石英 (Qtz) 脉穿切, 早期含有方铅 (Gn) 闪锌矿 (Sph) 化石英 (Qtz) 脉穿切大理岩, 而其又被后期无矿化石英脉穿切; F—闪锌矿 (Sph) 与方解石 (Cal) 共生, 均呈他形; G—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; H—闪锌矿 (Sph) 与黄铜矿 (Ccp) 形成典型的固溶体分离结构, 方铅矿 (Gn) 被闪锌矿 (Sph) 交代 (反射光); 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; Di—透辉石; Wo—硅灰石

Fig.4 Typical ore types and structures of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

A—Pyrite, Sphalerite, galena and Chalcopyrite in granular and fine veined forms in skarnized marble, containing lumpy calcite; B—Massive ore, containing little lumpy and fine-grained calcite; C—Galena, chalcopryite and pyrite in granular and veinlet forms in garnet-skarn, and late hydrothermal vein of calcite cutting through garnite-skarn; D—Galena in veined forms in wollastonite-garnet-skarn, containing euhedral and granular garnet; E—Two stages of hydrothermal quartz veins cutting through skarnized marble, with the early stage quartz vein containing galena and sphalerite, but late vein having no mineralization; F—Anhedral sphalerite associated with calcite; G—Pyrite associated with sphalerite, fine calcite cutting through anhedral-subhedral pyrite; H—Chalcopyrite and sphalerite assuming interstitial separation structure, and sphalerite replacing galena; Sph—Sphalerite; Gn—Galena; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Cal—Calcite; Grt—Garnet; Di—Diopside; Wo—Wollastonite

的成分也有一定的变化,从靠近二长花岗斑岩体的部位到远离岩体的方向,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观察,可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阶段。矽卡岩阶段主要形成石榴子石、透辉石、符山石等无水矽卡岩矿物,退化蚀变岩阶段则形成绿帘石、绿泥石、磁铁矿等矿物,石英硫化物阶段为主要的成矿阶段,形成黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等硫化物以及少量细脉状石英和方解石等,碳酸盐阶段形成宽大的无矿化的脉状方解石和石英等。

3 样品采集与分析方法

本文选择主要硫化物为测试对象,样品分别来自天堂铜铅锌多金属矿区钻孔 CK166-1、CK34-1、CK165-1、CK167-1、CK41-1 和 CK256-1。电子探针分析在中国地质科学院矿产资源所电子探针实验室完成,仪器为 JEOL-JAX8230 型电子探针,硅酸盐、氧化物分析条件为加速电压 5 kV、电流 20 nA、束斑直径 5 μm ,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,分析精度为 0.01%。

另外,本次工作还分析了主要矿石矿物黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿的 S、Pb 同位素,样品均来自矿区的不同矿体。本次研究的样品来自天堂铜铅锌多金属矿区钻孔 CK166-1、钻孔 CK34-1、钻孔 CK165-1、钻孔 CK170-1、钻孔 CK269-1 和钻孔 CK256-1。从中选取具有代表性的样品,经手工进行

逐级破碎、过筛在双目镜下挑选 40~60 目,纯度 > 99% 的单矿物样品 0.5 g 以上。将挑纯后的单矿物样品在玛瑙钵里研磨至 200 目以下,送实验室进行分析。S、Pb 同位素在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,测试仪器为 MAT-253, ISOPROBE-T 热电离质谱仪。

4 测试结果

4.1 硫化物特征

黄铁矿比较自形,粒状,颗粒大小不一,有时候与方铅矿、闪锌矿等共生产出,有时候沿石英脉、方解石脉等以脉状产出。黄铁矿的 8 个电子探针分析结果见表 1。天堂矿床中黄铁矿的 Fe 含量为 43.35%~47.09%,平均 46.02%,S 含量为 52.16%~53.696%,平均值为 53.21%,Pb 含量 0.05%~0.38%,Co 含量 0.07%~0.18%,其他元素含量较低。

闪锌矿手标本上呈棕色,常具团块状、星点状、浸染状等结构构造,与方铅矿、黄铁矿、黄铜矿和方解石等矿物共生。镜下颜色多样,包括浅黄褐色、黄褐色和红棕色,呈他形,有时被后期纯的热液方解石细脉穿切,有时也可见与石英硫化物期的方解石共生。闪锌矿的电子探针数据如表 2 所示。通过电子探针分析,闪锌矿中 Zn 含量 56.312%~65.22%(平均值为 62.234%),S 含量 32.872%~34.365%(平均值为 33.487%),高于闪锌矿理论 S 含量,低于理论 Zn 含量 (S:32.90%,Zn:67.10%)^[9]。Fe 含量 1.371%~8.611%,Cu 含量 0~2.086%,Pb 含量 0~0.288%,Se 含量 0~0.057%,Au 含量 0~0.292%,As 含量 0~0.062%,其他元素含量较低。结果显示,闪锌矿中富 Fe、Cu、

表 1 天堂铜铅锌多金属矿代表性黄铁矿电子探针分析结果(%)

Table 1 Representative electron microprobe analyses of pyrite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (%)

样号	Se	As	Au	S	Pb	Fe	Cu	Zn	Co	Ni	Sb	Bi	Total
T-19-1	0.01	0.03	-	52.17	0.24	46.70	-	-	0.15	-	-	-	99.29
T-113-1	-	-	-	53.68	0.23	46.18	-	0.01	0.11	0.05	0.02	-	100.27
T-119-1-2	-	-	-	53.29	0.16	47.09	-	0.01	0.10	-	0.01	-	100.66
T4-2-3-3	0.01	-	-	53.66	0.05	46.13	0.02	0.01	0.11	-	0.01	-	10-
T6-25-4-1	-	0.02	0.93	53.69	0.24	43.35	-	-	0.18	0.86	0.02	0.05	99.34
T6-26-1	-	0.02	-	52.16	0.34	46.09	0.03	0.03	0.07	-	-	-	98.74
T6-41(1)-1-3	-	-	-	53.70	0.38	46.25	-	-	0.09	-	0.02	-	100.43
T6-45(2)-1-2	-	-	-	53.38	-	46.37	0.02	0.02	0.10	-	-	-	99.88

注:“-”为低于检测限;分析误差小于 0.01%;FeO 为 Fe²⁺;分析者:陈振宇、陈小丹。

表 2 天堂铜铅锌多金属矿床闪锌矿电子探针数据 (%)
 Table 2 Electron microprobe analyses (%) of sphalerite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (%)

样品号	T-17(1)-2	T-103-1-2	T-103-3-1	T1-111-1-1	T1-111-1-2	T2-2(2)-1	T2-2(2)-2	T2-3-2	T3-4(1)-1-1	T3-4(1)-3-2	T3-14-1	T4-2-1-1	T7-2-2-1	T7-2-2-2
Se	0.006	0.008	0	0	0	0	0.057	0.013	0	0.001	0.02	0	0.005	0
As	0	0	0	0.062	0.054	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	-	-	-	0.02	0.292	0	0	-	0.071	0.048	-	0.077	0	0.031
S	32.953	32.872	33.036	34.365	34.286	33.625	34.074	33.146	33.231	33.122	33.196	33.722	33.26	34.068
Pb	0.011	0.171	0.288	0.06	0.202	0	0.053	0.132	0	0.189	0.117	0.061	0	0.148
Fe	1.722	1.371	2.288	8.407	8.611	5.032	3.241	3.778	2.593	1.763	1.844	1.678	2.398	2.656
Cu	0	0.11	0	0	0.01	0.039	0	0.035	0	0.039	2.086	0.046	0.688	0.03
Zn	63.972	64.162	63.825	56.6	56.312	60.694	62.914	62.059	63.787	64.686	62.125	65.22	63.812	62.823
Co	0.024	0	0	0.054	0.013	0.035	0.036	0.018	0.071	0	0.025	0.012	0	0
Ni	0.001	0	0.005	0.004	0.009	0.019	0.003	0	0	0	0	0	0	0
Te	-	-	-	0.006	0	0.012	0	-	0	0.006	-	0	0	0
Sb	0	0	0.04	0.03	0.039	0	0	0	0	0.008	0	0.019	0.06	0
Bi	0	0.024	0	0.057	0.037	0.036	0.089	0	0	0.022	0.003	0.056	0.052	0.077
Total	98.689	98.718	99.482	99.665	99.865	99.492	100.467	99.181	99.753	99.884	99.416	100.891	100.275	99.833

注：“-”为低于检测限；分析误差小于 0.01%；FeT 为 FeT；分析者：陈振宇、陈小丹。

Au 等元素,而 As、Se 的富集不明显。

方铅矿是主要的矿石矿物之一,铅灰色,常与闪锌矿等共生,有的颗粒比较大,也有的以细小颗粒状分布,镜下具有典型的黑三角特征。方铅矿的 5 个电子探针分析结果见表 3。5 件样品的 Pb 含量为 86.04%~86.51%,平均 86.25%,S 含量在 12.89%~13.35%,平均值为 13.16%,含有少量的 Se、Co、Ni 等元素。

黄铜矿多呈不规则状粒状或致密块状集合体,黄铜黄色,表面常被氧化带有锈色,镜下常与闪锌矿构成固溶体分离结构。黄铜矿的 4 个电子探针分析结果见表 4。黄铜矿的平均含量为 Cu 34.44%,Fe 29.43%,S 34.61%,Pb 含量 0.04%~0.21%,Co 含量 0.04%~0.06%,含有微量的 Ni、Ag、Ni 等元素。

4.2 硫同位素组成

天堂铜铅锌多金属矿床的硫同位素测试结果见表 5。

天堂铅锌矿床全部样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围在 -2.1‰ ~ 2.6‰ 之间,平均 0.046‰ ,极差 4.7‰ ,在 -0.8‰ ~ 0.4‰ 之间存在峰值。由表 5 可以明显看出,该矿区 ^{34}S 的富集规律满足 PbS (方铅矿) $<$ ZnS (闪锌矿) $<$ FeS_2 (黄铁矿) $<$ CuFeS_2 (黄铜矿)。而根据酒井和巴金斯基^[11]、郑永飞^[12]等关于硫化物 S 同位素在溶液中平衡结晶的理论,如果热力学达到平衡条件,

硫化物中 ^{34}S 的富集顺序为 PbS (方铅矿) $<$ CuFeS_2 (黄铜矿) $<$ ZnS (闪锌矿) $<$ FeS_{1-x} (磁黄铁矿) $<$ FeS_2 (黄铁矿) $<$ MoS_2 (辉钼矿)。很明显,天堂铅锌矿矿床硫化物中黄铁矿、方铅矿和闪锌矿达到了平衡,但黄铜矿异常,其硫源中的硫同位素未达到分馏平衡,这可能是由于变质改造作用或花岗岩侵入体的影响发生了硫同位素的再分配,这种现象在世界上也有许多实例,如乌拉尔矿床、普里奥尔斯克矿床等^[11]。

4.3 铅同位素组成

天堂硫化物铅同位素的测试结果见表 6。

天堂矿区硫化物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 38.765~39.137,平均值为 38.989,标准偏差为 0.113; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.523~15.751,平均值为 15.682,标准偏差为 0.066; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 18.450~18.667,平均值为 18.582,标准偏差为 0.070;从中明显可以看出,硫化物 Pb 的各同位素比值非常稳定,变化范围十分小,显示普通铅的特征。

5 讨论

在矿床学研究中,研究成矿物质来源是一个非常基本的问题^[13]。阐明成矿物质的来源,是认识矿床成因的基础^[14-15]。从世界大于 500 万 t 的铅锌矿床统计资料来看,不同成因类型的铅锌矿床,成矿物质及

表 3 天堂铜铅锌多金属矿代表性方铅矿电子探针分析结果 (%)

Table 3 Representative electron microprobe analyses of galena from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (wt%)

样号	Se	As	S	Pb	Fe	Cu	Zn	Co	Ni	Sb	Bi	Total
T3-4(1)-3-1	-	-	13.35	86.08	-	-	-	-	0.04	-	-	99.47
T-103-1-1	0.06	-	13.30	86.51	0.04	-	-	-	-	-	-	99.91
T-103-3-2	0.12	-	13.17	86.04	0.03	-	-	-	-	0.03	-	99.38
T3-9-1-2	0.08	-	13.09	86.43	-	0.09	0.01	0.01	-	-	-	99.71
T3-9-1-4	0.09	-	12.89	86.18	0.01	0.02	0.02	-	0.01	0.03	-	99.26

注:“-”为低于检测限;分析误差小于 0.01%;FeO 为 Fe^T;分析者:陈振宇、陈小丹。

表 4 天堂铜铅锌多金属矿代表性黄铜矿电子探针分析结果 (%)

Table 4 Representative electron microprobe analyses of chalcopyrite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (%)

样号	Se	As	Au	S	Pb	Fe	Cu	Zn	Co	Ni	Ag	Te	Sb	Bi	Total
T-119-2	-	-	-	34.03	0.13	30.64	34.53	-	0.06	-	-	-	-	-	99.38
T3-4(1)-1-2	-	-	1.02	34.70	0.11	28.20	33.97	0.09	0.04	0.02	0.02	-	0.03	-	98.20
T3-4(1)-3-3	0.04	-	-	34.89	0.21	29.29	34.69	0.04	0.04	0.02	0.01	-	-	-	99.23
T6-25-4-2	-	-	0.06	34.84	0.04	29.58	34.57	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	99.20

注:“-”为低于检测限;分析误差小于 0.01%;FeO 为 Fe^T;分析者:陈振宇、陈小丹。

表 5 天堂铜铅锌多金属矿床硫同位素测试结果

Table 5 Isotope data of ore minerals from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

序号	样号	测定矿物	岩性	$\delta^{34}\text{S-V-CDT}/\text{‰}$			
				数值	变化范围	极差	平均
1	Q-1	黄铜矿	含铜铅锌矿石	0.06			
2	Q-2	黄铜矿	含铜铅锌矿石	0.87	0.06~1.7	1.63	0.88
3	T1-16	黄铜矿	黄铜铅锌矿化矽卡岩化大理岩	1.7			
4	Q-3	黄铁矿	含铜铅锌矿石	0.66			
5	T-19	黄铁矿	矽卡岩化大理岩	1.5			
6	T-32	黄铁矿	含铜铅锌矿石	1.1			
7	T5-3	黄铁矿	黄铁矿化灰岩	1.1	-0.8~2.6	3.4	0.73
8	T6-14	黄铁矿	黄铁矿化矽卡岩	0.3			
9	T6-19	黄铁矿	矽卡岩	-0.8			
10	T6-43	黄铁矿	黄铁矿化矽卡岩化大理岩	-0.6			
11	T12-1	黄铁矿	黄铁矿化矽卡岩	2.6			
12	Q-4	方铅矿	含铜铅锌矿石	-1.3			
13	T-23	方铅矿	铅锌矿化矽卡岩	-1.1			
14	T-103	方铅矿	铅锌矿化矽卡岩	-1	-2.1~-1	1.1	-1.44
15	T1-2	方铅矿	含铁铅锌矿石	-2.1			
16	T7-2	方铅矿	含铁铅锌矿石	-1.7			
17	Q-5	闪锌矿	含铜铅锌矿石	0.03			
18	T-10	闪锌矿	铅锌矿化矽卡岩	0.1			
19	T1-8	闪锌矿	铅锌矿化矽卡岩	-0.5	-0.6~0.03	0.57	-0.24
20	T2-7	闪锌矿	铅锌矿化石	-0.6			

注：“-”为低于检测限；分析误差小于 0.01%；FeO 为 Fe^T；分析者：陈振宇、陈小丹。

表 6 天堂铜铅锌多金属矿床铅同位素测试结果

Fig.6 Pb isotope data of ore minerals from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

序号	样号	岩性	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$t(\text{Ga})$	μ	ω	Th/U
1	H-1	方铅矿 ^a	15.751	18.667	39.137	0.279	10.280	42.287	3.981
2	T-103	方铅矿 ^a	15.718	18.632	39.033	0.239	10.142	41.288	3.940
3	T1-2	方铅矿 ^a	15.733	18.631	39.063	0.270	10.210	41.790	3.961
4	T2-7	方铅矿 ^a	15.715	18.621	39.011	0.241	10.132	41.194	3.935
5	T5-6	方铅矿 ^a	15.719	18.634	39.036	0.240	10.147	41.135	3.940
6	QR-1	矿石	15.631	18.487	38.765	0.168	9.795	39.135	3.867
7	QR-2	矿石	15.672	18.545	38.866	0.210	9.961	40.097	3.896
8	QR-3	矿石	15.523	18.450	38.901	-0.040	9.339	37.814	3.919
9	QR-4	矿石	15.678	18.572	39.092	0.202	9.980	41.197	3.995
10	AVG	矿石	15.682	18.582	38.989	0.201	9.998	40.680	3.937

注：QR-1 到 QR-4 数据引自地矿部南岭铅锌矿专题组^[10]，数据处理用中国地质科学院矿产资源研究所韩发和李振清等(2005)开发的 Pb 应用软件包进行计算。

成矿流体的来源均有所区别^[6]。统计显示，世界上与岩浆岩有关的矽卡岩型、斑岩型、热液型铅锌矿硫同位素组成变化均较小，从表 2 可以看出，天堂铜铅锌多金属矿床的 S 同位素特征组成同样如此。

张乾等^[7]曾以铅同位素组成为分析对象，通过对矿石、成矿母岩及围岩 3 种铅同位素的组成进行研究，详细地对与中酸性侵入岩有关的接触交代矽卡岩型铜铅锌多金属矿床的物质来源进行讨论研

究，得出该类矿床物质来源主要有 3 种类型：岩浆源、岩浆与围岩混合源以及多源混合源。而在 3 种物质来源当中，岩浆与围岩混合源占绝大多数，如与天堂铜铅锌多金属矿床处于同一区域构造背景下的广西佛子冲、广西拉么、水口山和铜山岭等铅锌矿床。

5.1 硫化物成因矿物学意义

5.1.1 黄铁矿

将黄铁矿微量元素的含量与上地壳^[8]相比，相

对富集 Co、As、Sb、Bi 等元素,矿物所含微量元素在一定程度上反映了矿物的形成条件,可作为矿床成因的指示剂。利用黄铁矿中杂质元素 Co、Ni 含量及 S/Se 等相关比值来确定矿床成因已被证明是一种有效的方法^[19-20]。研究表明,不同成因的黄铁矿具有不同的 Co/Ni 值,沉积成因的黄铁矿 Co/Ni 值通常 <1,平均为 0.63;热液成因的黄铁矿其平均值约为 1.7,且一般 <5。从表中可以看出,天堂矿床黄铁矿 Co/Ni 比值变化范围为 0.21~2.28,平均为 1.25,指示黄铁矿为热液成因。魏菊英^[21]指出沉积成因的黄铁矿 S/Se 值 >2×10⁵,而热液成因黄铁矿的 S/Se 值 <2×10⁵,火山碎屑岩中的 S/Se 则更高,天堂矿床的 S/Se 范围为 6520~17895,同样指示黄铁矿为热液成因。

黄铁矿中主量元素 Fe 和 S 如何分配与其成因存在内在的联系^[9],天堂矿床中黄铁矿的 Fe 平均值为 46.02%,S 平均值为 53.21%,而黄铁矿的理论值化学式为 FeS₂,Fe 46.55%,S 53.45%^[9],很明显天堂矿黄铁矿比理论值稍低,可能是与 Co、Ni、As、Se 以类质同象分别替代 Fe、S,或者 Cu、Ag、Zn 等微量元素呈细分散状态机械混入有关^[22]。S/Fe 原子比介于 1.96~2.17 之间,平均 2.03,大部分都大于黄铁矿的理论 S/Fe 原子比,指示硫逸度较高的热液环境。

5.1.2 闪锌矿

通过闪锌矿的电子探针数据和镜下的显微照片,明显可以得出 Fe 含量与闪锌矿的颜色有一定的关系,含 Fe 量越高,闪锌矿的颜色相对比较深(图 5)。红褐色闪锌矿(T1-11,Fe 含量为 8.407)相对于浅黄褐色闪锌矿含 Fe 比较多;黄褐色的闪锌矿(T2-3,Fe 含量为 3.778),Fe 含量居中;含量最低的为浅黄褐色闪锌矿(T-103,Fe 含量为 1.371)。周家

喜等^[23-24]、刘铁庚等^[25]曾指出颜色比较深的闪锌矿 Fe 含量相对较高,暗示其形成温度相对较高,而相对而言颜色比较浅一点的闪锌矿中 Fe 含量相对很少,暗示其形成温度相对较低。通常闪锌矿中黄铜矿的出溶温度为 350~400℃,这与闪锌矿呈固溶体常分离出黄铜矿等矿相学事实相统一^[26],而天堂矿床闪锌矿和黄铜矿的固溶体分离结构比较发育。

据刘英超等^[27]报道闪锌矿 S/Zn 原子比可作为判断流体活动中心的重要标志,天堂矿床 S/Zn 原子比介于 1.040~1.237 之间,高于闪锌矿理论值,同样指示了硫逸度较高的热液环境。另外根据闪锌矿电子探针数据可得出 Zn 和 Fe 元素之间的相关关系图(图 6)。从图中可知,随着 Fe 的增加,Zn 明显减少,Zn 与 Fe 呈现出很好的反消长关系。Fe²⁺与 Zn²⁺具有相似的地球化学性质,离子半径、晶格能也相近,所以一般闪锌矿中 Fe 是以类质同象的形式置换 Zn^[28]。Zn 与 Fe 的负相关关系(R=-0.8348)反映出了 Zn 和 Fe 类质同象的替代关系。同时在部分闪锌矿检出 Au,鉴于电子探针成分分析结果中闪锌矿检出了一定量的 Au,故可对矿石样品进行进一步的金属元素含量的测定,从而去判断 Au 是否具有工业意义。

5.1.3 方铅矿

方铅矿的理论值为 Pb 86.6%、S 13.4%,5 件方铅矿样品的平均值为 Pb 86.25%、S 13.16%,含量比理论值偏低。方铅矿 Pb/S 理论值为 6.4627,而矿区 Pb/S 平均值为 6.7396,比理论值偏高,这可能是由于方铅矿中常含 Ag、Bi、Sb 和 Se 等元素,它们分别以类质同象形式代替了 Pb 和 S^[29]。

5.1.4 黄铜矿

天堂矿床黄铜矿的化学分子式为 CuFe_{0.97}S₂,与

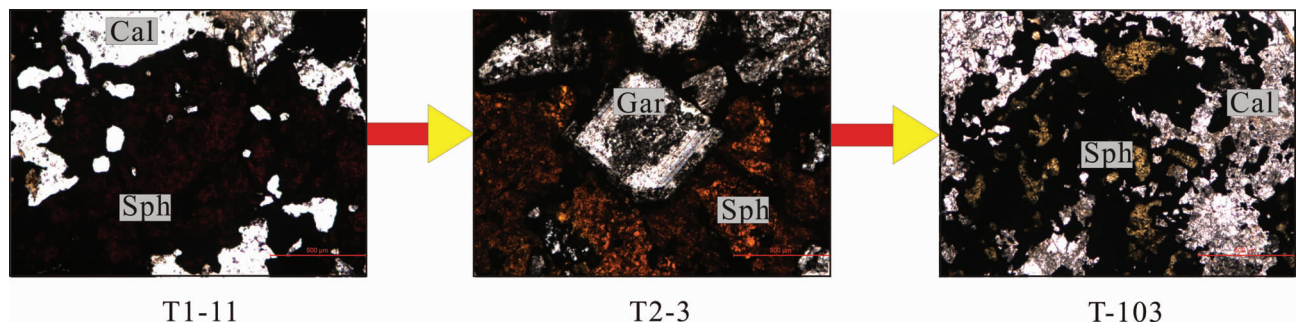


图 5 天堂铜铅锌多金属矿闪锌矿颜色变化对比图

Sph—闪锌矿;Gn—方铅矿;Grt—石榴石;Cal—方解石

Fig.5 Color comparison of sphalerite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

Sph-Sphalerite;Gn-Galena;Grt-Garent;Cal-Calcite

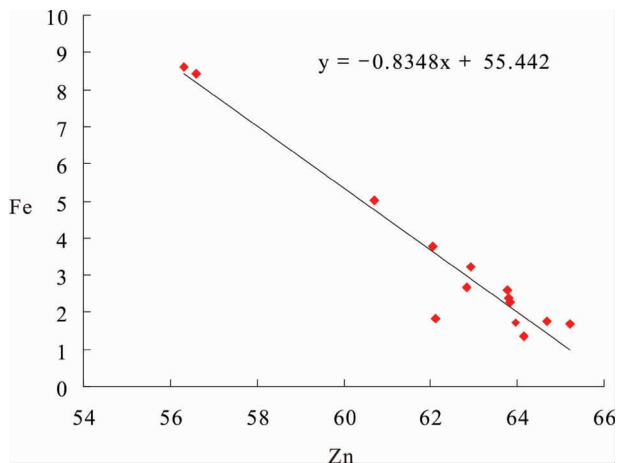


图 6 天堂矿床闪锌矿主元素 Zn-Fe(%)的关系图
Fig.6 Zn-Fe relationship of sphalerite in the Tiantang deposit, in weight

理论式 CuFeS_2 相比, Fe 元素可能被以类质同象的形式所代替, 含量稍低, 同样指示硫源比较充足的热液环境。

5.2 硫同位素特征

通过硫同位素组成的研究, 可以帮助了解和判断成矿物质的来源^[30], 从而有助于推断矿床中铜、铅、锌等成矿元素的来源, 进而探讨矿床的成因^[31]。

天堂铜铅锌多金属矿床的硫化物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿, 矿物组合比较简单且硫酸盐矿物很少, 反映出成矿热液中不同价态的硫之间以及不同成矿阶段的硫同位素分馏都比较弱。同时, 从上述矿床硫化物中硫同位素组成看, 硫化物

间的硫同位素基本达到了平衡, 故矿床中几种简单硫化物的硫同位素组成基本代表了成矿流体的硫同位素组成^[32-33]。

在硫的频率直方图上 (图 7), $\delta^{34}\text{S}$ 的峰值主要集中在 -0.8‰ ~ 0.4‰ 之间, 各种矿石矿物的 $D^{34}\text{S}$ 值 (-2.1‰ ~ 2.6‰) 十分接近零值, 尤其对于同一矿物而言变化范围更小, 呈较为明显的塔式分布特征。资料表明, 基性岩 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 $+2.7\text{‰}$ ($+7.6\text{‰}$ ~ $+5.7\text{‰}$), 超镁铁质岩 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 $+1.2\text{‰}$ ($+7.3\text{‰}$ ~ -1.3‰), 石陨石 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 $+2.6\text{‰}$ ~ -5.6‰ 之间^[34], 其他岩石 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围如图 8 所示。因此, 笔者认为天堂铜铅锌多金属矿床硫同位素主要来自上地幔或下地壳的深源岩浆, 具有相对均一的硫源, 基本没有或者很少受到陆壳沉积物硫源的混染。

5.3 铅同位素特征

在一般情况下方铅矿中的 U、Th 含量极少, 可以忽略不计, 故方铅矿中的铅均多为普通铅, 可探讨性地计算其模式年龄^[36]。但是, 计算结果有时可以得出比较精确的成矿时代, 而有时却无意义。根据 S-K 两阶段铅演化模式, 计算出铅同位素的系数列于表 3 中。

天堂多金属矿床矿石铅的两阶段模式年龄 t 变化范围为 168~279 Ma (-40 Ma 为负数, 不具有模式年龄的意义, 故舍去), 集中分布在 201~241 Ma 之间。笔者通过 Rb-Sr 法测定该矿床的主要矿石矿物闪锌矿及其共生矿物, 获得比较精确的成矿时代为 98 Ma (未发表资料), 反映了天堂矿床的矿石铅并

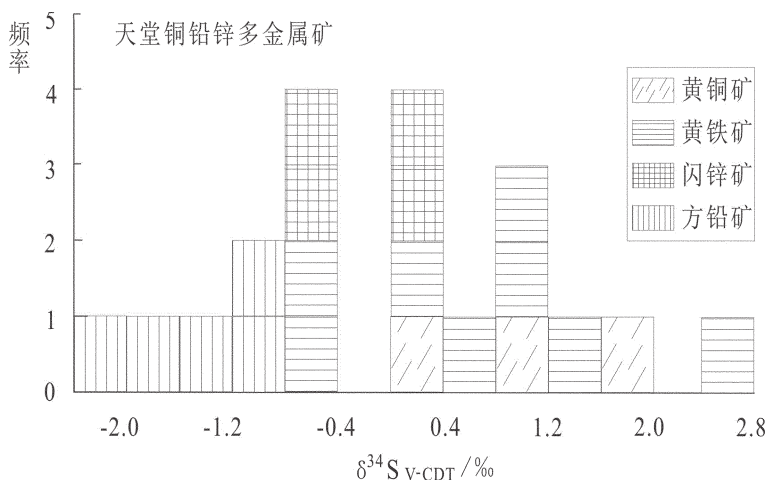


图 7 天堂铜铅锌多金属矿床硫同位素组成直方图

Fig. 7 Histogram of S isotopes in ore minerals from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

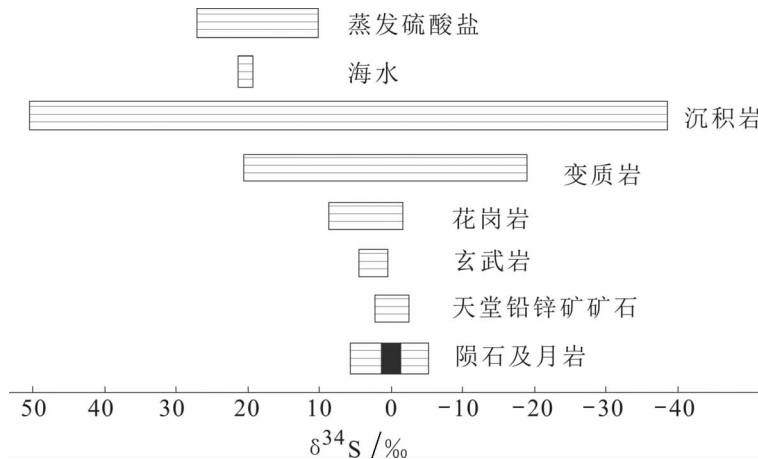


图 8 天堂铜铅锌多金属矿床 S 同位素组成分布图(底图据韩吟文等^[35],除了矿石硫数据)

Fig.8 Distribution of S isotopes in ore mineral from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (base map after Han Yinwen et al. ^[35], except for ore mineral data)

非正常铅,而是混合铅,有放射性成因铅的加入。

同时,特征值中 μ 值的变化也可以提供地质体经历的某些地质作用的信息,反应铅的来源。从表 6 中由两阶段铅演化模式计算的参数 (μ 、 w 、 Th/U) 看,不同样品的 μ 、 w 、 Th/U 模式值均有一定的变化,说明其来源并不单一,无论是方铅矿、闪锌矿还是黄铜矿、黄铁矿,它们的铅同位素均具有非单一阶段的演化,可能是有不同的源区或在演化过程中有不同源区物质的混入^[37]。一般认为来自下部地壳或者上地幔铅 μ 值比较低^[38]。据 Doe et al.^[39]资料地幔环境 μ 值为 8.92,造山带 μ 值为 10.87。由表 6 可知,天堂铜多金属矿床的矿石矿物铅同位素 μ 值变化较小,比较集中,方铅矿的 μ 值从 9.339~10.280,明显高于地幔 μ 值 (8.92) 而低于造山带 μ 值 (10.87),显示铅的来源主要为壳幔混合。其他特征值如 μ 、 v 、 w 、 Th/U 、 U/Pb 和 Th/Pb 比值均基本相同,反应来源的相似性^[40]。

Doe and Zartman^[39]根据世界不同构造环境的显生宙岩石和矿床的铅同位素组成建立了不同地质环境下的铅同位素构造模式图。笔者将天堂矿床的硫化物铅同位素投图(图 9),在图 9(a)中落入了 Doe and Zartman 铅构造模式图下地壳和造山带之间,在图 9(b)中铅同位素落入了地幔和上地壳之间,从上地壳线之上到上地壳线与造山带线之间,再到造山带线与地幔线之间都有分布,由于造山作用本身有地壳物质的混染。因此,笔者认为成矿作用过程中铅部分来自地幔物质,同时也有地壳物质的加入。

朱炳泉^[42]认为钍铅的变化以及钍铅与铀铅同位素组成的相互关系对于地质过程与物质来源能提供非常丰富的信息,为突出这种变化关系,将 Pb 同位素表示成与同时代地幔的相对偏差,从而提出了矿石铅同位素 $\Delta\alpha - \Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解。本文根据样品 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 相对于同时代地幔的 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 的偏差值 $\Delta\gamma$ 和 $\Delta\beta$, 做出天堂铜铅锌多金属矿床 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 图解(图 10)。由图中可以看出,天堂铜铅锌多金属矿床矿石矿物的 Pb 同位素点总体上落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围内,靠近造山带铅的边界,少部分落入造山带铅范围内,很明显这与 Doe and Zartman 铅构造模式图 Pb 示踪的成矿物质来源基本一样,均指示来自于壳幔混合。

5.4 地质意义

通过大量的放射性同位素定年人们已经对华南地区金属矿床的成矿时限及其动力学背景有了一定的认识。谢桂青^[43]提出华南地区的岩石圈伸展主要出现于 180~155 Ma、145~125 Ma 和 110~75 Ma 3 个阶段;毛景文等^[44]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 3 个时间段,其中 110~80 Ma 是华南一次影响全区的大规模伸展阶段。135 Ma 之后,中国大陆处于持续伸展阶段,这是由于太平洋板块的运动方向发生转向,由斜俯冲转向几乎平行大陆边缘运动的结果^[45-50]。在华南地区,成矿作用集中发生在火山盆地、断陷盆地和变质核杂岩中,阳春盆地便是其中的典型代表之一。阳春盆

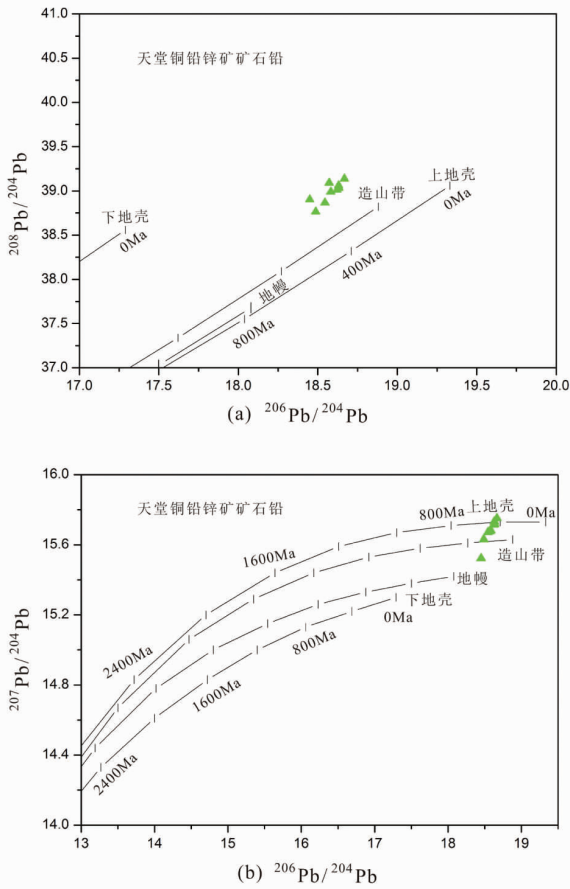


图9 天堂铜铅锌多金属矿床矿石铅同位素图(底图据 Zantman and Doe^[41], 1981)

Fig.9 Pb isotope in ore minerals from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (base map after Zantman and Doe^[41], 1981)

地所在的粤西—桂东南地区白垩纪矿化是中国东部大陆边缘成矿的一部分,盆地内天堂大型铜铅锌多金属矿床的闪锌矿及其共生矿物的 Rb-Sr 等时线年龄为 98 Ma(郑伟等,未发表资料),石碇大型铜钼矿的成矿岩体 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 (107±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^[51],鸚鵡岭铜铅锌钨钼多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (83.0±1.7)Ma(郑伟等,未发表资料),均属于 110~80 Ma 的成矿阶段,故笔者认为包括阳春盆地在内的粤西地区在 110~80 Ma 之间岩石圈处于拉张伸展的环境下,与整个华南地区所处的地球动力学背景一致^[44,47,50,52],而且古钦杭结合带断裂和构造等比较发育,有利于岩浆的侵位和壳幔物质的相互作用,故在 100~80 Ma 之间区内成岩成矿强度大。综合天堂铜铅锌多金属矿床已有的研究成果,笔者认为该矿床是晚中生代

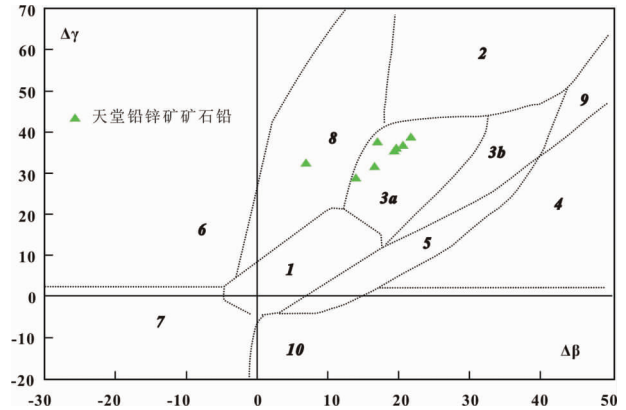


图10 天堂铜铅锌多金属矿床铅同位素 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解(底图据朱炳泉等^[42], 1998)

1—地幔源铅;2—上地壳铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a 岩浆作用,3b 沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅; $\Delta\beta = 1000 \times (\beta / \beta_{M-1})$, $\Delta\gamma = 1000 \times (\gamma / \gamma_{M-1})$, β 、 γ 和 β_M 、 γ_M 分别为样品和地幔的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

Fig.10 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ genetic classification diagram of lead isotopes of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (base map after Zhu Bingquan et al. ^[42], 1998)

1—Mantle derived lead; 2—Upper crust lead; 3—Mixed lead of upper crust and mantle subduction zone (3a: Magmatism, 3b: Sedimentation); 4—Chemical sedimentary lead; 5—Submarine hydrothermal lead; 6—Medium-high grade metamorphism lead; 7—Lower crust lead of high grade metamorphism; 8—Orogenic belt lead; 9—Upper crust lead of anicent shale; 10—Retrograde metamorphic lead; $\Delta\beta = 1000 \times (\beta / \beta_{M-1})$, $\Delta\gamma = 1000 \times (\gamma / \gamma_{M-1})$, β and γ are values of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ respectively in samples, β_M and γ_M are values of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ respectively in the mantle

以来华南地区岩石圈伸展作用的结果。

6 结论

(1)天堂铜铅锌多金属矿床电子探针分析发现:黄铁矿中 Fe、S 含量和 S/Fe 原子比普遍高于理论值,存在一定量的 Cu、Sb、As 元素,Co/Ni 比值一般大于 1,指示硫逸度较高的热液环境;闪锌矿中 Zn 含量比理论值稍低,S/Zn 原子比和 S 含量较理论值偏高,同样指示硫逸度较高的环境;方铅矿、黄铜矿等硫化物元素间均有类质同象现象的发生。

(2)矿石硫同位素组成变化范围较窄(-2.1‰~2.6‰),平均值为 0.046‰,具有较明显的塔式分布特征,主要为岩浆来源,基本没有或者很少受到陆壳沉积物源硫的混染。

(3)天堂铜铅锌多金属矿床矿石铅为异常铅,铅同位素组成变化范围比较小, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的范围分别为 38.765~39.137、15.523~15.751、18.450~18.667,具有明显的壳幔混合特征。

(4)天堂铜铅锌多金属矿床是晚中生代以来华南地区岩石圈伸展作用的结果。

致谢:本文完成过程中得到了武广研究员、袁顺达副研究员、徐林刚博士的指导;野外工作期间,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公司的大力支持和帮助;资料收集过程中得到了中国地质大学(北京)吴越、赵辛敏的帮助;成文过程中得益于审稿专家所提出的许多建设性意见,在此一并致谢!

参考文献 (References):

- [1] 司徒宏, 郑昌能, 黄德鑫. 天堂铜多金属矿地质特征与找矿前景[J]. 西部探矿工程, 2004, (5):76-77.
Si Tuhong, Zheng Changneng, Huang Dexin. The geological characteristics and prospecting prospect of Tiantang chalcopyrite polymetallic deposit [J]. West-china Exploration Engineering, 2004, (5):76-77(in Chinese with English abstract).
- [2] 彭松柏, 金振民, 付建明, 等. 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, 2006, 25(4):434-441.
Peng Songbai, Jin Zhenmin, Fu Jianming, et al. Geochemical characteristics of basic intrusive rocks in the Yunkai uplift, Guangdong-Guangxi, China, and their tectonic significance [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(4):434-441(in Chinese with English abstract).
- [3] 梁约翰, 张启富, 杨世义, 等. 云开隆起区成矿规律与成矿预测[M]. 北京:地质出版社, 1998:1-10.
Liang Yuehan, Zhang Qifu, Yang Shiyi, et al. Ore-forming Regularities and Ore-searchina Prediction of Yunkai Uplift [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1998:1-10 (in Chinese with English abstract).
- [4] 沈睿文, 海涛, 刘昌明. 广东阳春盆地多金属找矿潜力浅析[J]. 地质与勘探(增刊), 2010, 46:1249-1255.
Shen Ruiwen, Hai Tao, Liu Changming. Analysis of potential polymetallic deposits in the Yangchun Basin in Guangdong Province [J]. Geology and Prospecting, 2010, 46 (Supp.):1249-1255 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张乾, 张宝贵, 潘家永, 等. 粤西茶洞银金矿床矿质来源的同位素示踪研究[J]. 矿床地质, 1993, 12(4):349-357.
Zhang Qian, Zhang Baogui, Pan Jiayong, et al. An isotopic tracing study of the material source of the Chadong silver-gold polymetallic deposit in Western Guangdong Province [J]. Mineral Deposit, 1993, 12(4):349-357(in Chinese with English abstract).
- [6] 马大铨, 赵子杰, 林惠坤. 广东阳春盆地岗尾—石篆型花岗岩类中包体的岩石特征及其成因 [J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1985, 10:59-72.
Ma Daquan, Zhao Zijie, Lin Huikun. Petrographical study of the enclaves from the Gangwei-Shilu-Type granitoids in Yangchun basin of Guangdong and discussion on their genesis [J]. Journal of the Chinese Academy Yichang Geological Sciences, 1985, 10:59-72(in Chinese with English abstract).
- [7] 于津生, 桂训唐, 李培忠, 等. 广东阳春盆地花岗岩类同位素、微量元素地球化学研究[J]. 广东地质, 1998, 13(3):1-9.
Yu Jinsheng, Gui Xuntang, Li Peizhong, et al. Isotope and trace elements of granite in Yangchun basin, Guangdong Province [J]. Guangdong Geology, 1998, 13 (3):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵子杰, 马大铨, 林惠坤, 等. 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, 1985, 10:89-98.
Zhao Zijie, Ma Daquan, Lin Huikun, et al. Rubidium-strontium and oxygen isotopic composition of the two types of granitoids in Yangchun area, Guangdong Province and discussion on their origin [J]. Journal of the Chinese Academy Yichang Geological Sciences, 1985, 10:89-98(in Chinese with English abstract).
- [9] 王濮, 潘兆楷, 翁玲宝. 系统矿物学(上册)[M]. 北京:地质出版社, 1984:261-263.
Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Lingbao. System Mineralogy [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1984:261-263 (in Chinese with English abstract).
- [10] 地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组著. 南岭地区铅锌矿床成矿规律[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 1985:120-179.
Geology and Mineral Resources Division of the Ministry of Nanling lead-zinc Theme Group. The Metallogenic Regularity of Nanling Leda-zinc Deposits [M]. Chasha:Hunan Science and Technology Press, 1985:120-179 (in Chinese with English abstract).
- [11] 格里年科 B A. 硫同位素地球化学[M]. 赵瑞译. 北京:科学出版社, 1980:146-220.
Gerry B A. Sulfur Isotope Geochemistry [M]. Zhao Rui (translator). Beijing:Science Press, 1980:146-220(in Chinese).
- [12] 郑永飞. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京:科学出版社, 2000:218-247.
Zheng Yongfei. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing:Science Press, 2000:218-247(in Chinese with English abstract).
- [13] 翟裕生. 矿床学的百年回顾与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5):719-724.
Zhai Yusheng. Hundred years' retrospect and developing trend of mineral deposit geology [J]. Advances in Earth Science, 2001, 16 (5):719-724(in Chinese with English abstract).
- [14] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1):13-27.
Zhai YuSheng. On the Metallogenic System [J]. Earth Science Frontier, 1999, 6(1):13-27(in Chinese with English abstract).
- [15] 翟裕生. 成矿系统研究与找矿[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(2):65-71.
Zhai Yusheng. The research and prospecting of metallogenic system

- []]. Geological Survey and Research, 2003, 26 (2):65-71 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李永胜, 吕志成, 严光生, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床 S、Pb、H、O 同位素特征及其指示意义[J]. 地学前缘, 2011, (18):1-10.
Li Yongsheng, Lv Zhicheng, Yan Guangsheng, et al. Isotopic characteristics of S, Pb, H and O of Jiama copper-polymetallic ore deposit, Tibet and their significance [J]. Earth Science Frontier, 2011, 18:1-10(in Chinese with English abstract).
- [17] 张乾, 潘家永. 论接触交代矽卡岩型多金属矿床的矿质来源——以铅同位素组成为依据[J]. 矿物学报, 1994, 14(4):369-372.
Zhang Qian, Pan Jiayong. Sources of ore-forming materials of the contact metasomatic skarn-type Cu-Pb-Zn deposits in special reference to their lead isotopic composition [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1994, 14(4):369-372(in Chinese with English abstract).
- [18] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976, 3:167-174.
Li Tong. Chemical element abundances in the earth and its major shells [J]. Geochimica, 1976, 3:167-174 (in Chinese with English abstract).
- [19] 徐国风, 邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质论评, 1980, 26(6):541-546.
Xu Guofeng, Shao Jielian. The typomorphic characteristics of pyrite and its practical significance[J]. Geological Review, 1980, 26 (6):541-546(in Chinese with English abstract).
- [20] Brill B A. Trace-element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn Deposit, Australia [J]. Canadian Mineralogist, 1989, 27:263-274.
- [21] 魏菊英. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988:104-134.
Wei Juying. Isotope Geochemistry [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1988:104-134 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王璞, 潘兆橹, 翁玲宝. 系统矿物学 [M]. 北京:地质出版社, 1982:448-457.
Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Lingbao. Systematic mineralogy[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1982:448-457 (in Chinese with English abstract).
- [23] 周家喜, 黄智龙, 周国富. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律[J]. 矿物学报, 2009, 29(4):471-480.
Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Zhou Guofu. The occurrence states and regularities of dispersed elements in Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(4):471-480(in Chinese with English abstract).
- [24] 周家喜, 黄智龙, 周国富. 黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源:S、Pb 同位素和 REE 制约 [J]. 地质论评, 2010, 56 (4):513-524.
Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Zhou Guofu. Sources of the ore metals of the Tianqiao Pb-Zn deposit in Northwestern Guizhou Province:constraints from S, Pb isotope and REE Geochemistry [J]. Geological Review, 2010, 56 (4):513-524 (in Chinese with English abstract).
- [25] 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 等. 闪锌矿中的 Cd 主要类质同象置换 Fe 而不是 Zn[J]. 矿物学报, 2010, 30(2):179-184.
Liu Tiegeng, Ye Lin, Zhou Jiayi, et al. Cd primarily isomorphously replaces Fe but not Zn in sphalerite [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(2):179-184(in Chinese with English abstract).
- [26] 徐国风. 矿相学教程 [M]. 武汉:武汉地质学院出版社, 1986:133-146.
Xu Guofeng. Mineralography Tutorial [M]. Wuhan: Wuhan Geological College Press, 1986:133-146 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘英超, 杨竹森, 侯增谦, 等. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床围岩蚀变和黄铁矿-闪锌矿矿物学特征及意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(3):490-506.
Liu Yingchao, Yang Zhusen, Hou Zengqian, et al. Wall rock alteration and pyrite-sphalerite mineralogy of the Dongmohazhua Pb-Zn ore deposit in Yushu area, Qinghai Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(3):490-506(in Chinese with English abstract).
- [28] 夏学惠. 东升庙多金属硫铁矿床闪锌矿特征及形成条件[J]. 岩石矿物学杂志, 1992, 11(4):375-383.
Xia Xuehui. Characteristics and formation conditions of sphalerite in the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1992, 11(4):375-383(in Chinese with English abstract).
- [29] 靳是琴, 李鸿超. 成因矿物学概论 [M]. 长春:吉林大学出版社, 1986:40-50.
Jin Shiqin, Li Hongchao. The Generality of Genetic Mineralogy [M]. Changchun:Jilin University Press, 1986:40-50 (in Chinese with English abstract).
- [30] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1986, 16(1):491-559.
- [31] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1985:51-53.
Zhang Ligang. The application of the stable isotope to geology—the hydrothermal mineralization of metal activation and its prospecting [M]. Xi'an:Shaanxi Science and Technology Press, 1985:51-53(in Chinese with English abstract).
- [32] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 1972, 67:551-579.
- [33] Ohmoto H, Rye RO. Isotopes of sulfur and carbon[C]//Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, New York:John Wiley & Sons, 1979:509-567.
- [34] 丛柏林. 岩浆活动与火成岩组合[M]. 北京:地质出版社, 1979:355.
Cong Bailin. Magmatic Activity and Igneous Combination [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1979:355 (in Chinese with English abstract).
- [35] 韩吟文, 马振东, 张宏飞. 地球化学 [M]. 北京:地质出版社, 2003:254-255.
Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei. Geochemistry [M].

- Beijing: Geological Publishing House, 2003:254-255 (in Chinese with English abstract).
- [37] 韩发. 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, 2006, 25(5):582-589.
Han Fa. How to explain Pb isotope data: comments on a paper by She Hongquan et al [J]. Mineral Deposit, 2006, 25(5):582-589(in Chinese with English abstract).
- [38] 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 西藏驱龙斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成: 对含矿斑岩与成矿物质来源的指示 [J]. 地质学报, 2006, 80(4): 554-560.
Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Li Zhenqing. Sulfur and lead isotope compositions of the Qulong porphyry copper deposit, Tibet: implications for the sources of plutons and metals in the deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(4):554-560(in Chinese with English abstract).
- [39] 朱上庆, 黄华盛. 层控矿床地球化学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1988:177-205.
Zhu Shangqin, Huang Huasheng. Strata-bound Deposit Geochemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988:177-205(in Chinese with English abstract).
- [40] Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics the Phanerozoic, [C]// Barnes H L (ed.). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. John Wiley & Sons, New York, 1979:509-567.
- [41] 费光春, 多吉, 温春齐, 等. 西藏洞中拉铅锌矿床 S、Pb、Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. 矿物岩石, 2011, 31(4):52-57.
Fei Guangchun, Duoji, Wen Chunqi, et al. S, Pb and Sr isotopic compositions for tracing sources of ore-forming materials in Dongzhongla lead-zinc deposit in Tibet [J]. 2011, 31(4):52-57(in Chinese with English abstract).
- [42] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonic—the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75:135-162.
- [43] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京:科学出版社, 1998:216-235.
Zhu Bingquan. Isotopes in the Earth Science System Theory and Application——On the Evolution of the Continental Crust and Mantle [M]. Beijing: Science Press, 1998:216-235(in Chinese with English abstract).
- [44] 谢桂青. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例 [D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2003:1-128.
Xie Guiqing. Late Mesozoic Mafic Dikes (body) from Southeastern China: Geological and Geochemical Characteristics and Its Geodynamics——A case of Jiangxi Province[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2003:1-128 (in Chinese with English abstract).
- [45] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 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, 2004, 11(1):45-55.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (1):45-55 (in Chinese with English abstract).
- [46] Goldfarb R J, Hart C, Davis G, et al. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons [J]. Economic Geology, 2007, 102(3):341-345.
- [47] Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10):2329-2338 (in Chinese with English abstract).
- [48] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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, 2007, 23(10): 2329-2338.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10):2329-2338(in Chinese with English abstract).
- [49] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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, 2008, 14(4):510-526.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4):510-526(in Chinese with English abstract).
- [50] 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 等. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 2009, 55(3):347-354.
Mao Jinwen, Xie Guiqing, Cheng Yanbo, et al. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China [J]. Geological Review, 2009, 55(3):347-354(in Chinese with English abstract).
- [51] 赵海杰, 胡耀国, 郑伟, 等. 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, 2012, 39(6):1604-1613.
Zhao Haijie, Hu Yaoguo, Zheng Wei, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Shilu Cu(Mo) deposit in western Guangdong Province, China and its geological implications [J]. Geology in China, 2012, 39(6):1604-1613(in Chinese with English abstract).
- [52] 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与钨成矿关系研究的若干问题 [J]. 矿床地质, 2007, 26(2): 139-152.
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, et al. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China [J]. Mineral Deposits, 2007, 26(2):139-152(in Chinese with English abstract).

Characteristics of sulfides and S–Pb isotope composition in the Tiantang Cu–Pb–Zn polymetallic deposit of Guangdong Province and their Geological implications

ZHENG Wei¹, CHEN Mao–hong², ZHAO Hai–jie²,
HAO Hong–da¹, LUO Da–lue³, HU Yao–guo³, ZHAO Xin–min¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. Geological Survey of Guangdong Province, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

Abstract: The Tiantang Cu–Pb–Zn polymetallic deposit of Guangdong Province occurs at the northeast edge of Yangchun basin, which is located in the Qinzhou–Hangzhou metallogenic belt. On the basis of geological field observations, the authors selected main sulfides in the deposit as the object to study the mineralogical characteristics, and analyzed the S–Pb isotopic composition so as to trace and discuss the sources of ore–forming metal materials. Representative results 1 of electron microprobe analysis show that Fe and S content and atomic ratios of S/Fe in pyrite are higher than theoretical values, there exist Cu, Sb and As, and the ratios of Co/Ni are between 0.21 and 2.28, usually higher than 1, suggesting a hydrothermal environment of relatively high sulfur fugacity; in sphalerite the Zn content is lower than theoretical values while the atomic ratios of S/Zn and the S content are higher than theoretical values, with the existence of some Pb, Fe, Co and Se; some elements in galena, chalcopyrite and other sulfides occur in isomorphism. $\delta^{34}\text{S}$ values of the main ore minerals of this deposit have a narrow range of $-2.1\text{‰}\sim 2.6\text{‰}$, with peaks at $-0.8\text{‰}\sim 0.4\text{‰}$, showing tower–shaped distribution effect and features of magmatic sulfur. Lead isotopic compositions of ores are basically coincident, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of ores vary from 38.765 to 39.137, 15.523 to 15.751 and 18.450 to 18.667, respectively. These lead compositions indicate that the ore–forming materials not only had features of the lower crust or the upper mantle but also had characteristics of the upper crust, indicating that there should have been several sources for ore–forming materials in the Tiantang deposit, belonging to crust–mantle mixture, and the ore deposit was formed due to lithospheric extension in southern China since the Late Mesozoic.

Key words: isotope composition; mineralogical characteristics; sources of ore–forming materials; Tiantang Cu–Pb–Zn polymetallic deposit; Qinzhou–Hangzhou metallogenic belt

About the first author: ZHENG Wei, male, born in 1988, master, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit; E–mail: zhengwei19880824@126.com.

Corresponding author: ZHAO Hai–jie, female, born in 1982, doctor; E–mail: zhaohaijie_610@163.com.