

大兴安岭中南段布敦化铜矿床 H-O-S-Pb 同位素特征及成矿指示

武新丽¹ 毛景文^{1,2} 周振华² 欧阳荷根¹

(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 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, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要:布敦化铜矿是大兴安岭中南段一个斑岩-热液脉型复合铜矿床, 包括南部的金鸡岭斑岩型铜矿段和北部的孔雀山热液脉型铜矿段。本文在详细的矿床地质特征研究基础上, 通过对矿体的氢、氧、硫和铅同位素系统研究, 探讨了成矿流体和成矿物质来源以及成矿机制。氢、氧同位素组成表明, 金鸡岭矿段与孔雀山矿段早期成矿流体主要以岩浆水为主, 至成矿晚期有大气降水的参与。硫同位素分析结果表明金鸡岭矿段相对富集重硫, 成矿热液的硫同位素组成为+2.54‰~+2.60‰。而孔雀山矿段相对富集轻硫, 成矿热液的 S 同位素组成为-1.84‰~-1.71‰, 两矿段的硫同位素组成表明硫主要来源于地球深部, 铅同位素组成则表明铅具壳幔混合的特点, 其来源与岩浆活动密切相关。结合大兴安岭中南段区域地质演化历史认为, 布敦化矿床两个矿段的成矿作用均是由流体混合而导致黄铜矿等金属硫化物的大量沉淀。

关键词:稳定同位素; 成矿流体; 成矿物质; 布敦化铜矿; 大兴安岭中南段

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2012)06-1812-18

大兴安岭地区是古生代古亚洲洋成矿域与中生代滨太平洋成矿域强烈叠加的区域, 独特的地质背景使得本区具有成矿条件优越、成矿强度大等特点。大兴安岭中南段铜矿带上, 已探明的铜矿床主要有敖尔盖、台布呆、驼峰山、扁扁山、香山、布敦化、莲花山和闹牛山等大、中、小型铜矿床和众多矿(化)点(图 1-a)。矿化类型主要为热液脉型, 其次为斑岩型。布敦化铜矿床是大兴安岭中南段铜矿带内最具代表性的铜矿床之一, 该矿床于 1958 年由当地群众发现, 1979 年由吉林省地质局第七地质大队进行勘探, 为一中型铜矿床。此后, 一些学者^[1-3]对布敦化铜矿床的矿床地质特征进行了研究, 盛继福等^[2]报道了该矿床花岗岩体 Rb-Sr 年代学的研究, 获得了成岩年龄为 166~170.2 Ma, 王湘云^[4]对矿区的岩体进行了地球化学特征分析, 刘城先^[5]对该矿床的矿床

成因进行了阐述, 确定了该矿床两个矿段成因类型分别为斑岩型和热液脉型。然而, 对于布敦化铜矿床的成矿物质来源研究较少, 这在很大程度上制约了对成矿机制的深入理解。本文在前人研究成果的基础上, 对布敦化铜矿床的地质特征进行了详细研究, 系统测试了矿区内典型样品的氢、氧、硫和铅同位素组成, 探讨了成矿流体和成矿物质来源, 以期对矿床的形成机制提供制约。

1 区域地质背景

布敦化铜矿床大地构造位置属于大兴安岭南段晚古生代增生造山带(图 1-b), 该造山带北、南界线分别为西拉木伦断裂和二连—贺根山断裂, 向东被嫩江断裂所截。区域上出露的地层主要有下二叠统变质砂岩、板岩、片理化凝灰质砂岩, 中—上侏罗统

收稿日期: 2012-11-07; 改回日期: 2012-11-28

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212011085260)和内蒙古重要矿产资源潜力评价及区域成矿规律研究项目(2006-02-YS01)联合资助。

作者简介: 武新丽, 女, 1986 年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: wuxinli1122@163.com。

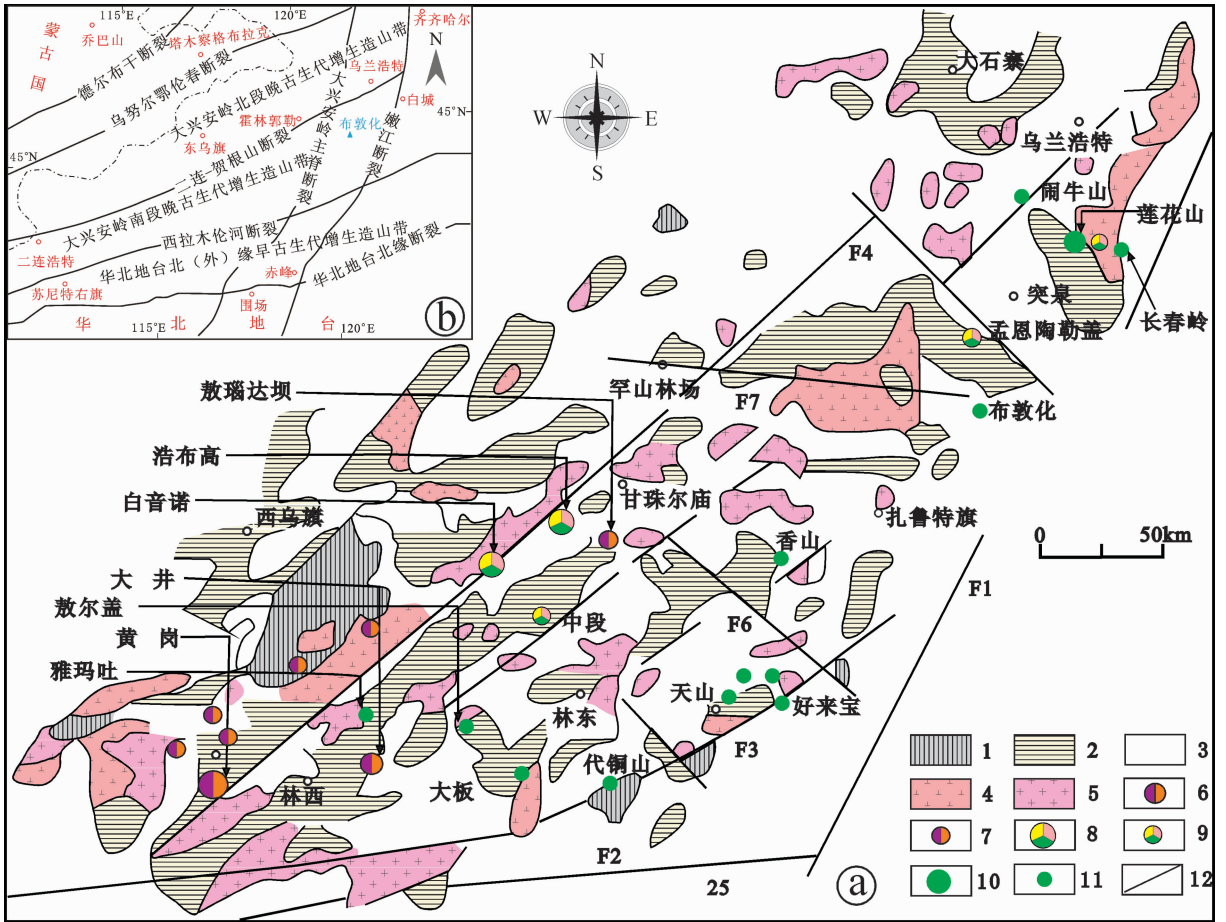


图 1 大兴安岭中南段成矿带区域地质及重要矿产分布图

(图(a)据参考文献[6]; 图(b)据参考文献[7-8])

- 1—石炭系沉积岩; 2—二叠系安山岩、砂板岩; 3—侏罗系凝灰质砂砾岩; 4—华力西期岩浆岩; 5—燕山期岩浆岩;
- 6—大型锡多金属矿床; 7—中小型锡多金属矿床; 8—大型铅锌银金属矿床; 9—中小型铅锌银金属矿床;
- 10—大型铜多金属矿床; 11—中小型铜多金属矿床; 12—断裂带

Fig.1 Regional geological map showing the distribution of major ore deposits along the middle-South section of the Da Hinggan Mountains metallogenic belt (modified after References [6], [7-8])

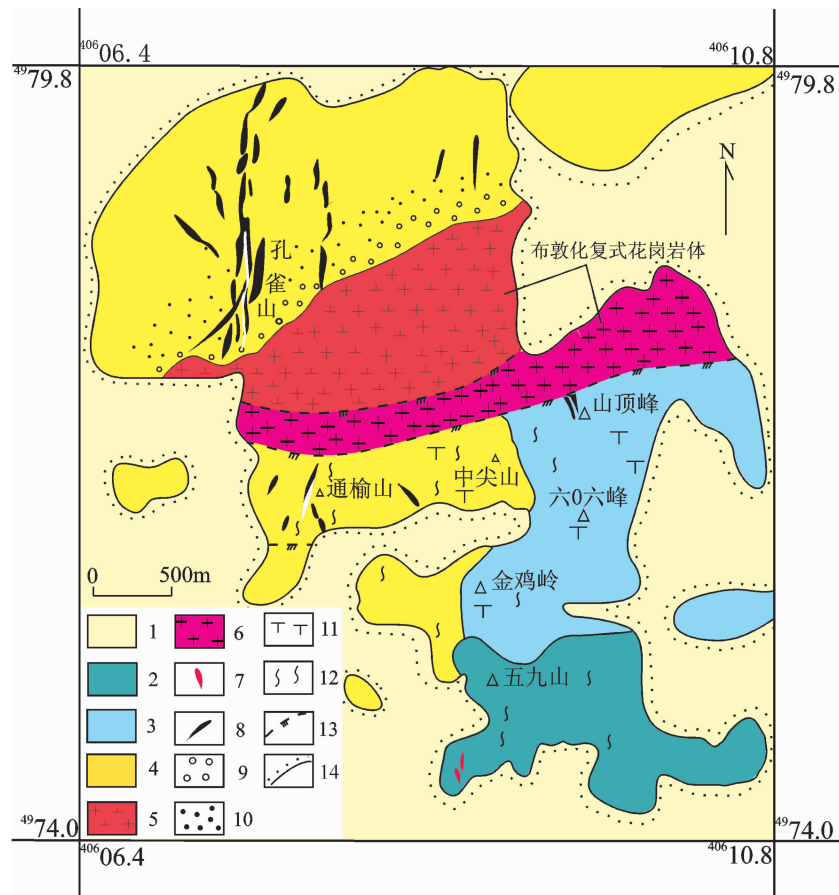
- 1—Carboniferous sediments; 2—Permian andesite, sandstone; 3—Jurassic tuffaceous sandy conglomerate; 4—Variscan magmatic rock; 5—Yanshanian magmatic rock; 6—Large tin polymetallic ore deposit; 7—Small and medium tin polymetallic ore deposit;
- 8—Large lead-zinc silver metal deposit; 9—Small and medium lead-zinc silver metal deposit; 10—Large Cu polymetallic ore deposit; 11—Small and medium Cu polymetallic ore deposit; 12—Fault belt

砂砾岩和中酸性熔岩、上白垩统中基性熔岩夹凝灰岩以及第四系冲积、湖积粘土、砂砾层和风积砂等。区内经历了华力西期及燕山期构造运动,以 EW 向构造及 NNE 构造为主,EW 向构造和 NNE 向构造交汇部位常形成弧形构造,如科右中旗联合弧形构造。EW 向构造以孟恩陶勒盖-洮安挤压断裂为代表,控制了布敦化—敖都木铜(多金属)铁成矿带; NNE 向构造以罕山向斜及通榆山冲断层为代表,展布方向 15°~25°,规模均较小。区域岩浆岩主要有华力西期受 EW 向构造体系控制的黑云母英云闪长

岩、白云母英云闪长岩;燕山期受 NNE 向与 EW 向构造交汇部位控制的花岗岩类、花岗闪长岩类及其派生的中酸性脉岩。

2 矿床地质特征

布敦化铜矿床以布敦化复式岩体为界,分为南部的金鸡岭斑岩型铜矿段和北部的孔雀山热液脉型铜矿段,二者相距 1 km(图 2)。矿区内出露的地层主要为古生界下二叠统青凤山组 (P_{1q}) 和大石寨组 (P_{1d}),中生界中侏罗统万宝组 (J_{2w})、上侏罗统满克头

图2 布敦化铜矿床地质图^①

- 1—第四系松散沉积物;2—上侏罗统满克头鄂博组凝灰质角砾岩;3—中侏罗统万宝组凝灰质砂砾岩;
4—下二叠统大石寨组变质砂岩;5—燕山期黑云母花岗闪长岩;6—燕山期花岗岩;7—闪长玢岩脉;
8—铜矿脉;9—角岩;10—角岩化;11—云英岩化;12—绢英岩化;13—断裂;14—不整合界线

Fig.2 Geological map of the Budunhua Cu deposit^①

- 1—Quaternary unconsolidated sediments; 2—Upper Jurassic Manketou 'ebo Formation tuffaceous breccia; 3—Middle Jurassic Wanbao Formation tuffaceous sandy conglomerate; 4—Lower Permian Dashizhai Formation metasandstone; 5—Yanshanian biotite granodiorite porphyry; 6—Yanshanian granodiorite; 7—Diorite porphyrite vein; 8—Copper vein; 9—Hornfels; 10—Hornfelsization; 11—Greisenization; 12—Sericitization; 13—Fault; 14—Unconformity

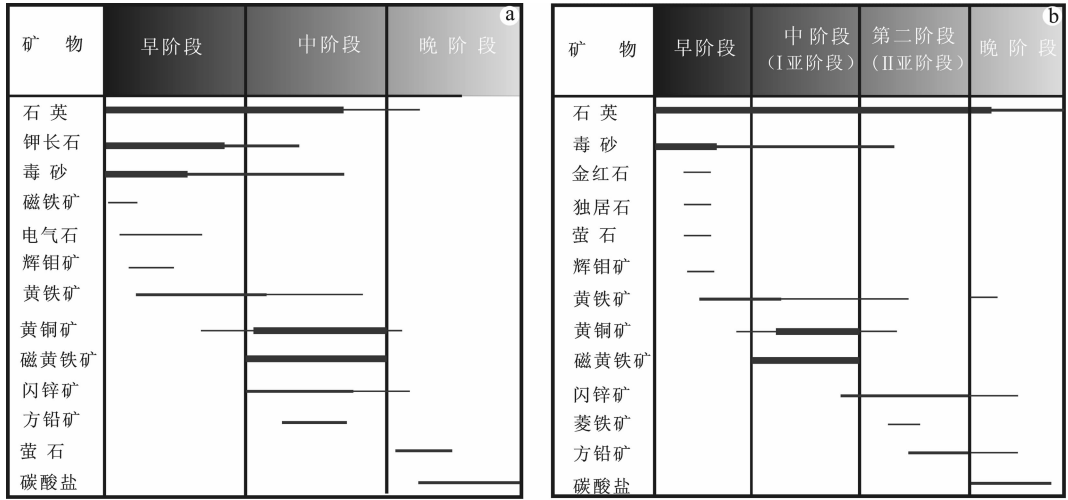
鄂博组(J_3m)以及新生界第四系(Q)等。其中,青凤山组(P_1q)主要分布在矿区东部,呈北东 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 展布,组成岩石主要为变质黑云母砂岩、斑点状黑云母片岩和云母板岩等。大石寨组(P_1d)主要出露在矿区西北部,为矿区内主要含矿围岩之一,地层总体走向为 $75^{\circ}\sim 80^{\circ}$,其组成岩石主要为变质砂岩、条纹状变质砂岩和云母石英片岩等^①。万宝组(J_2w)分布在中央山以东,六〇六峰、金鸡岭一带,地层总体走向北东,呈角度不整合覆盖于大石寨组地层之上,主要岩性为砾岩、凝灰质砾岩、凝灰质砂砾岩和凝灰质砂岩^②。

满克头鄂博组(J_3m)仅在五九山冲断层以南出露,地层走向 $310^{\circ}\sim 325^{\circ}$,岩石主要为凝灰质角砾岩和岩屑晶屑凝灰岩等^①。第四系(Q)以松散沉积物为主,次为冲积、洪积粘土和残坡积碎石等,分布广泛,多在洼地、沟谷中,厚 $1\sim 20$ m^②。

矿区构造主要由3条北东向挤压带组成,自北向南为草稿吐—查顺花挤压带,布敦化挤压带及五九山冲段带。分布在矿区中部的布敦化复式背斜是布敦化挤压带的主要组成,其轴部为布敦化复式岩体。南北向构造以断裂为主,总体显示向西陡倾并具

① 内蒙古地矿局 115 地质队. 内蒙古自治区科尔沁右翼中旗布敦花铜矿田隐伏铜矿成矿规律和成矿预测研究报告, 1994.

② 内蒙古自治区 114 地质队. 内蒙古自治区科尔沁右翼中旗布敦花铜矿金鸡岭矿区详细普查地质报告, 1980.



注: 很发育; 一般发育; 较少发育

图 3 金鸡岭和孔雀山矿段不同成矿阶段矿物生成顺序图

Fig.3 Schematic representation of mineral paragenetic relationships associated with mineralization stages of the Jinjiling and Kongqeshan ore blocks

有等间距分布特点,控制着孔雀山矿段等矿脉和脉岩的展布。其次,部分矿脉受北北东向和北北西向构造控制,规模小于南北向构造。金鸡岭斑岩铜矿主要受岩体冷凝产生的裂隙和上述构造产生的次级构造控制,形成广泛的含矿破碎带^[9]。

区内岩浆岩主要为布敦化复式花岗岩体。由黑云母花岗闪长岩、花岗斑岩、英云闪长斑岩和闪长玢岩等组成,前二者出露于矿区北部,后二者分别隐伏于金鸡岭矿区及孔雀山矿区下部。其中黑云母花岗闪长岩和英云闪长斑岩为侵入岩相,形成较早,成岩时间分别为(165±2)Ma和160 Ma^[9],花岗斑岩和闪长岩为脉岩相,且据地表见到的闪长玢岩切穿了花岗斑岩(图 4-a),反映了闪长玢岩属脉岩相中花岗斑岩之后产生。

2.1 金鸡岭斑岩铜矿段

矿体主要赋存于英云闪长斑岩的内、外接触带中,主要在外带下二叠统大石寨组(P₁d)及中生界中侏罗统万宝组(J₂w)内,矿化受英云闪长斑岩形态的控制,在其突出与凹陷部位的外接触带矿化较好,尤其是岩体突出部位矿化富集,矿化主要为浸染状、网脉浸染状及小脉状。单矿体长几十至百余米,厚 1~3 m,局部厚度变大。

该矿段围岩蚀变主要有钾长石化、黑云母化、电英岩化、硅化、绢英岩化、绢云母化、青磐岩化和碳酸

盐岩化。蚀变以英云闪长斑岩为中心,出现明显的分带,在岩体及近围岩主要为钾长石化、黑云母化和电英岩化带,并与早期形成的硅化相伴生。其中钾长石化主要交代英云闪长斑岩,也有交代斑岩体附近的围岩,如变质砂岩和角岩等,其生成较早,为成矿前的蚀变岩;黑云母化出现较为局限,主要出现在英云闪长斑岩体内外接触带,被绢英岩化、绿泥石化等交代,同样为成矿前的蚀变岩;电英岩化有时以电气石单矿物出现,有时与石英共生为电英岩,主要交代英云闪长斑岩或变质砂岩或砂砾岩等,其与成矿关系在空间上有一定距离,即矿体不赋存在电气石化带内。远离岩体逐渐变为弱的电气石化和硅化带,电气石化生成较早并伴生有少量硅化,后期又有大规模的硅化生成而叠加在早期的硅化带之上;远离岩体更远位置为绢英岩化带,早期的电气石化、硅化明显被绢英岩化交代,该带与成矿关系较为密切,往往是赋矿蚀变带;最外面为青磐岩-碳酸盐化带,该带为成矿晚期的蚀变带,仅伴有少量的黄铁矿化^[10]。

根据矿物组合与共生关系(图 3-a),将布敦化铜矿金鸡岭矿段划分 3 个成矿阶段:早阶段,即毒砂-黄铁矿(黄铜矿)-石英阶段,主要矿物组合为石英、毒砂、黄铁矿和黄铜矿等,金属硫化物主要以浸染状的细网脉状分布,黄铁矿、毒砂均为自形-半自形结构产出(图 4-b),它们往往被后期的金属硫化

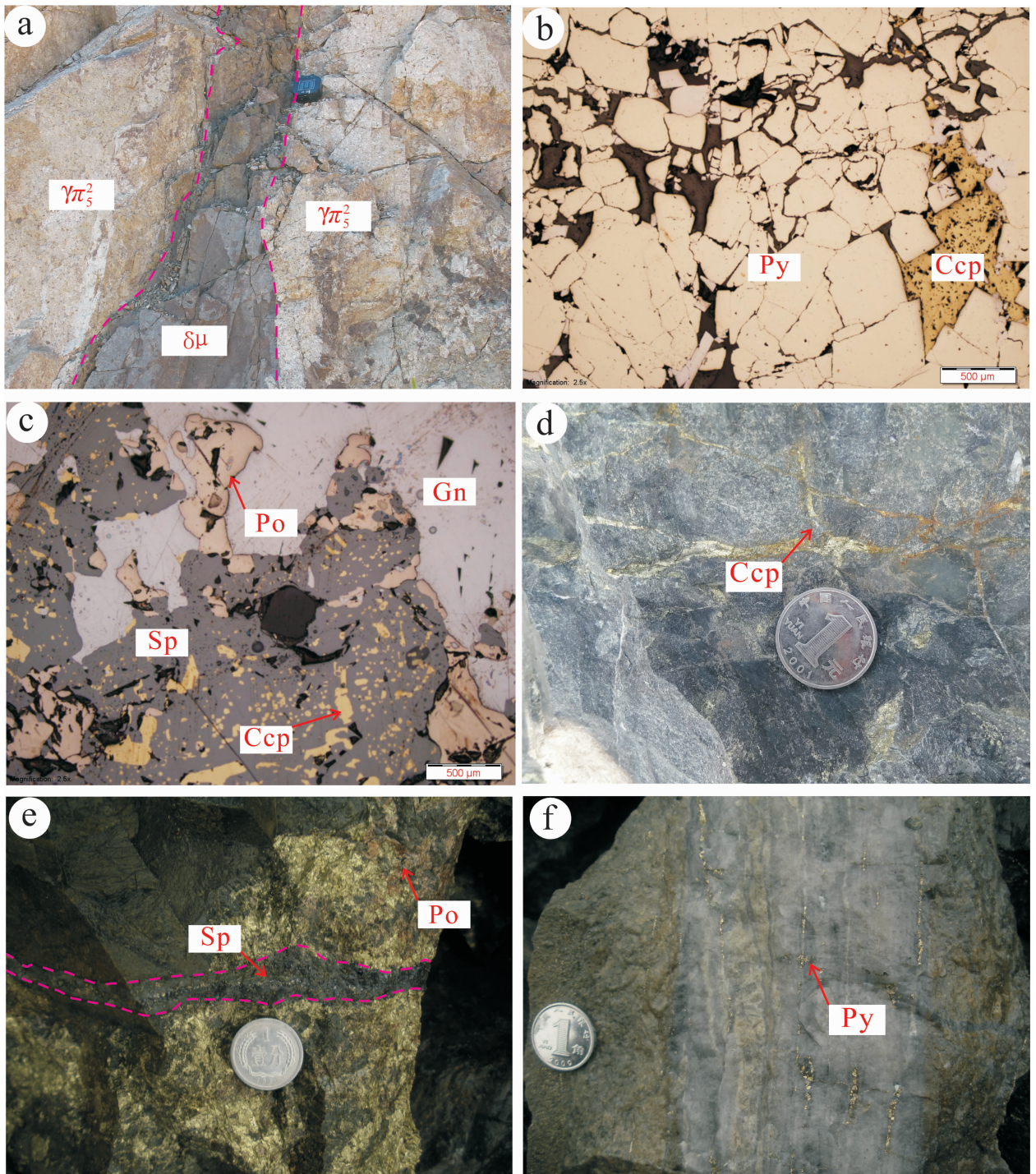


图4 布敦化铜矿床金鸡岭矿段矿石类型及野外地质构造现象照片

a—花岗岩脉被闪长玢岩脉切穿;b—早阶段黄铁矿结构;c—交代残余结构;d—浸染状构造;e—中阶段黄铜矿—磁黄铁矿脉被晚阶段闪锌矿脉切穿;f—晚阶段黄铁矿—石英脉;图中的缩写: $\delta \pi_2$ —花岗岩; $\delta \mu$ —闪长玢岩脉; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Sp—闪锌矿

Fig.4 Ore types and tectonic phenomena photos in the field of the Jinjiling ore block in the Budunhua Cu deposit
a—Granite porphyry vein cut by dioritic porphyrite vein; b— Structure of pyrite of the early stage; c—Metasomatic relict texture ;
d— Disseminated structure; e—Chalcopyrite—pyrrhotine veinlets of the second stage cut by sphalerite veinlet of the late stage; f—Late-stage pyrite—quartz veinlet;
 $\delta \pi_2$ —Granite porphyry; $\delta \mu$ —Diorite porphyrite; Ccp— Chalcopyrite; Py—Pyrite; Po— Pyrrhotine; Sp— Sphalerite

物所交代,该阶段钾长石化、硅化、电气石化、黑云母化强烈。中阶段,即黄铜矿-磁黄铁矿-石英阶段,是铜矿化的主要阶段,形成大量黄铜矿、磁黄铁矿(图 4-e)及少量方铅矿和闪锌矿等,硫化物多呈细脉状(图 4-d)和浸染状分布,个别地段可见到块状构造。该阶段结构比较复杂,骸晶结构、包含结构、固溶体分离结构和交代残余结构普遍发育,而以交代残余结构为主,表现为成矿较晚期的闪锌矿对相对较早期的黄铜矿、磁黄铁矿(图 4-c)进行交代,但交代作用进行的不彻底,残留被交代矿物。蚀变类型以硅化、绢云母化为主,叠加前期蚀变之上^①。晚阶段,即黄铁矿-方铅矿-闪锌矿-碳酸盐阶段,主要以黄铁矿与方铅矿、闪锌矿共生或单独见黄铁矿为特征(图 4-f),呈细脉浸染状分布于石英脉中,其中黄铁矿、方铅矿颗粒较小,主要为他形;闪锌矿呈黑色,晶形较好,有时可见与碳酸盐脉共生。伴随的蚀变类型为绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化及少量的黄铁矿化。

2.2 孔雀山热液脉状铜矿段

孔雀山矿段位于布敦化矿区西北部,南北长 1.8 km,东西宽 0.8 km。矿体受南北向破裂带控制,矿体通常呈不规则弯曲脉状,沿闪长玢岩、安山玢岩岩脉与变质岩接触带间的断裂破碎带充填交代产出(图 5-a)。孔雀山矿段内已查明矿脉 12 条,大致呈南北向陡倾斜产出。

孔雀山矿段围岩蚀变主要有硅化、黑云母化、绢云母化、钠长石化、绿泥石化和碳酸盐化等。其中,硅化是区内主要的矿化蚀变,一般受微细裂隙控制,与矿脉关系密切,是区内强蚀变带的主要组成部分;黑云母化常呈脉状和团状出现,多被晚期的蚀变交代而形成绿泥石,常与钠长石化共生,矿体多富集在该蚀变带内;绢云母化多与硅化关系密切,一般蚀变较弱,矿化作用不明显。

根据矿物组合与共生关系(图 3-b),可将孔雀山铜矿段分为如下 3 个成矿阶段:早阶段(毒砂-黄铁矿-石英阶段),矿化较为普遍,整个矿段均可见到,多矿物组合为石英、斜方砷铁矿、毒砂和黄铁矿等,多呈团块状分布于石英脉中,黄铁矿、毒砂一般呈自形-半自形结构(图 5-b)产出,该阶段硅化、钠长石化强烈。中阶段,矿物组合较为复杂,以多金属硫化物脉(图 5-d)为特征,特别是磁黄铁矿、黄铜矿

(图 5-f)矿化显著。可细分为两个亚阶段或世代,Ⅰ亚阶段(黄铜矿-磁黄铁矿-闪锌矿-石英阶段)为主要的矿化阶段,矿化广泛,形成矿床的主体,矿物组合为石英、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿和毒砂等。该阶段的黄铜矿一般呈微细乳滴状分布于闪锌矿中(图 5-c),或者交代毒砂、闪锌矿、磁黄铁矿等,有时还可见单一黄铜矿细脉;磁黄铁矿一般呈他形粒状,多数被黄铜矿交代或包含。围岩蚀变以黑云母化、硅化为主;Ⅱ亚阶段(黄铜矿-磁黄铁矿-闪锌矿-方铅矿-石英阶段)矿化较弱,多见于构造活动复合部位,共生矿物有石英、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿(图 5-e)、方铅矿和菱铁矿等,以裂隙充填脉状为主,有的被晚期不含矿碳酸盐脉所切穿,交代作用不明显,主要蚀变为硅化。晚阶段(黄铁矿-石英-碳酸盐阶段),矿化范围亦较广泛,往往以形成单独的黄铁矿脉为特征,另有少量黄铁矿呈细脉状切割中阶段的磁黄铁矿和黄铜矿等(图 5-f)。有时可见与碳酸盐、石英-碳酸盐、碳酸盐-萤石伴生,它们穿插或交代前几个阶段的矿脉,主要蚀变为碳酸盐化。

3 样品及分析方法

本次研究所用样品分别采自金鸡岭矿段及孔雀山矿段不同中段、不同勘探线的坑道中,均为代表性的矿石。采样位置详见表 1,2,3。测定用的单矿物分离样品经粉碎、研磨至 20~80 目,在显微镜下手工挑选,单矿物纯度均在 99%以上。

本文氢氧同位素组成分析在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质开放研究实验室完成。其中,石英的氧同位素组成测定采用 Clayton and Mayeda^[1]所叙述的 BrF₃法制备 CO₂,用 BrF₃与含氧矿物在真空和高温条件下反应提取矿物氧,并与灼热电阻-石墨棒燃烧转化提取 CO₂气体,将所得之气体在 MAT-253EM 型质谱仪上分析其 O 同位素组成;石英内包裹体水的氢同位素组成(δD)测定用爆裂法获取水,Coleman^[12]等的铗法制成 H₂,最后,在 MAT-253EM 型质谱仪上分析其 H 同位素组成,分析精度分别为 $\pm 0.2\%$ ^[11]和 $\pm 2\%$ ^[12],相对标准为 V-SMOW。

硫化物矿物的 S、Pb 同位素组成分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中,硫同位素样品是将硫化物单矿物与氧化亚铜按一定

^①内蒙古地矿局 115 地质队.内蒙古自治区科尔沁右翼中旗布敦化铜矿田隐伏铜矿成矿规律和成矿预测研究报告,1994.

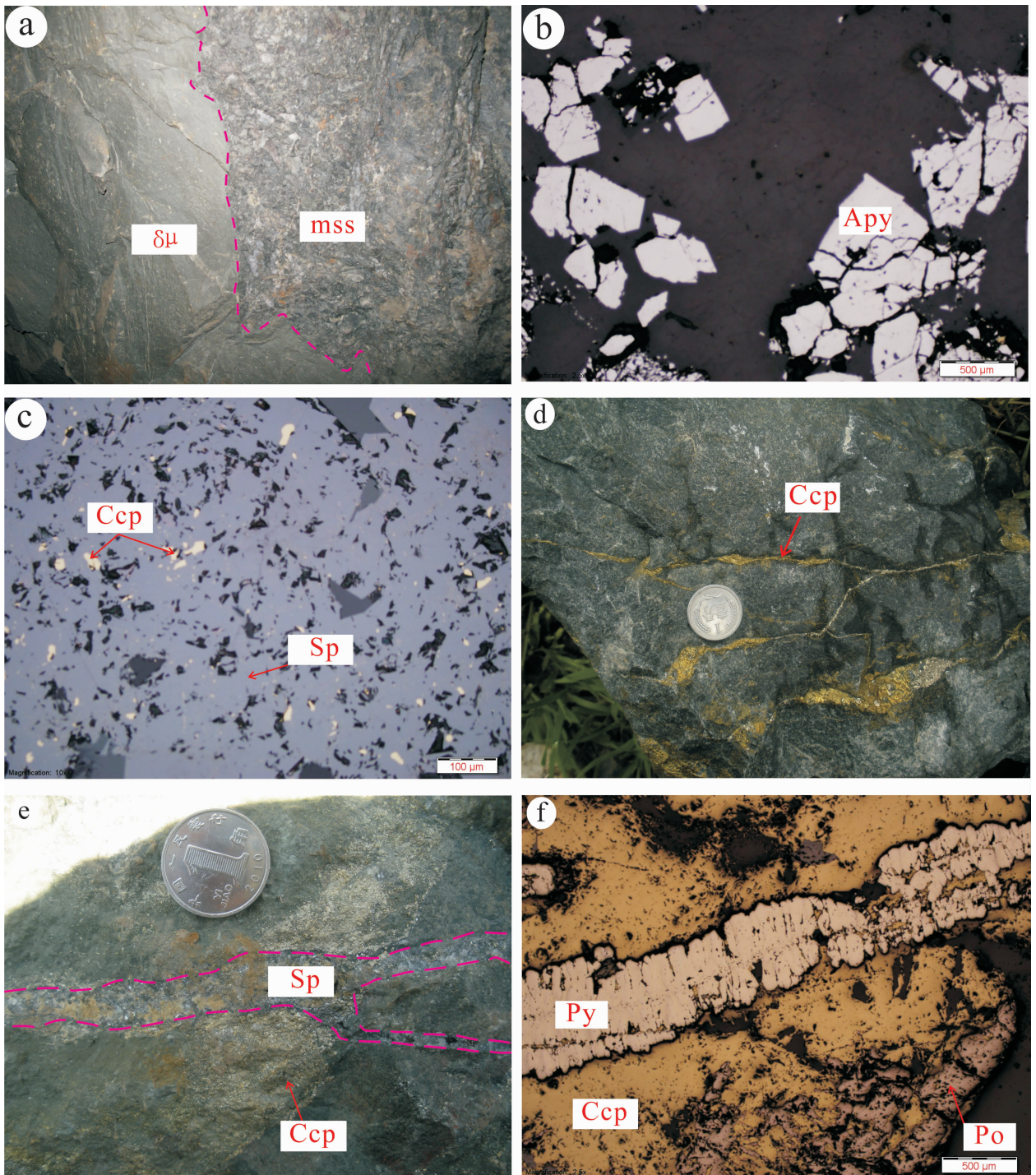


图 5 布敦化铜矿床孔雀山矿段矿石类型及野外地质构造现象照片

a—闪长玢岩脉与变质砂岩的分界;b—早阶段毒砂结构;c—固溶体分离结构;d—细脉浸染状构造;e—中阶段黄铜矿—磁黄铁矿脉被晚阶段闪锌矿脉切穿;f—晚阶段黄铁矿脉切穿中阶段黄铜矿—磁黄铁矿脉;图中的缩写: $\delta\mu$ —闪长玢岩; mss—变质砂岩; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Sp—闪锌矿; Apy—毒砂

Fig.5 Ore types and tectonic phenomena photos in the field of the Kongqeshan ore block in the Budunhua Cu deposit
a—Boundary of diorite porphyry and metasandstone; b—Structure of arsenopyrite of the early stage; c—Exsolution structure;
d—Veinlet-disseminated structure; e—Chalcopyrite-pyrrhotine veinlets of the second stage cut by sphalerite veinlet of the late stage
f—Chalcopyrite-pyrrhotine veinlets of the second stage cut by late-stage pyrite veinlet; $\delta\mu$ —Diorite porphyry; mss— Metasandstone;
Ccp— Chalcopyrite; Py—Pyrite; Po— Pyrrhotine; Sp— Sphalerite; Apy—Arsenopyrite

比例研磨、混合均匀后,进行氧化反应,生成 SO_2 并用冷冻法收集,然后用 MAT251 气体同位素质谱仪分析硫同位素组成,测量结果以 VCDT 为标准,分析精度优于 $\pm 0.2\%$;铅同位素样品先用混合酸分解,然后用树脂交换法分离出铅,蒸干后用热表面电离质谱法进行铅同位素测量,仪器型号为 ISOPROBE-T,测量精度为对 $1 \mu\text{g}$ 铅,其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 低于 0.05% , $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 一般不大于 0.005% 。

4 分析结果

4.1 硫同位素组成

金鸡岭矿段金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -0.10% ~ $+4.93\%$ (24 件样品,表 1),极差为 5.03% ,平均值为 2.36% 。其中,黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -0.1% ~ $+2.83\%$ (9 件样品),平均为 1.91% ;黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+0.4\%$ ~ $+4.93\%$ (10 件样品)平均为 $+2.69\%$;磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+0.4\%$ ~ $+2.88\%$ (5 件样品),平均为 $+2.52\%$ 。硫同位素表现为以较小的正值特征,相对富集重硫。

而在孔雀山矿段金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体为负值,表现出轻硫富集的特征。34 件金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -4.90% ~ $+0.70\%$ (表 1),极差为 5.6% ,平均为 -1.39% 。其中,黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -4.9% ~ $+0.7\%$ (19 件样品),平均为 -1.68% ;黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.4% ~ $+0.5\%$ (10 件样品),平均为 -0.74% ;磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -4.5% ~ -0.3% (4 件样品),平均为 -1.65% ;方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.4% (1 件样品)。硫同位素组成变化范围相对较集中,显示硫同位素组成比较稳定。然而孔雀山矿段较金鸡岭矿段明显富集轻硫的特征,我们推测可能是两个矿段成矿物理化学条件的不同而影响的。有资料表明,当氧化势升高时,含矿溶液或流体中的硫发生氧化,会引起同位素分馏,而使硫的还原型化合物富集轻硫^[13]。

通常认为,在硫同位素分馏达到平衡条件下,共生硫化物(包括硫酸盐)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值按硫酸盐 \rightarrow 辉钼矿 \rightarrow 黄铁矿 \rightarrow 磁黄铁矿和闪锌矿 \rightarrow 黄铜矿 \rightarrow 方铅矿的顺序递减^[14]。除孔雀山矿段 1 件方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 外,布敦化铜矿中矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均表现出 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 磁黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 黄铜矿的趋势,表明成矿期矿床中共生的硫化物硫同位素分馏基本达到了平衡。

4.2 铅同位素组成

金鸡岭矿段矿石中 8 件金属硫化物的 $^{206}\text{Pb}/$

^{204}Pb 值为 $18.274\sim 18.333$,极差为 0.059 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.510\sim 15.579$,极差为 0.069 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $38.022\sim 38.247$,极差为 0.225 (表 2)。孔雀山矿段矿石中 6 件金属硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $18.248\sim 18.344$,极差为 0.096 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.476\sim 15.518$,极差为 0.042 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $37.911\sim 38.097$,极差为 0.186 (表 2)。上述结果显示,无论是金鸡岭矿段还是孔雀山矿段矿石铅的各同位素比值都十分稳定,变化范围较小,显示出具有正常铅的特征。

4.3 氢、氧同位素

布敦化铜矿床氢、氧同位素组成的测试结果列于表 3。其中,金鸡岭矿段成矿早-中阶段的 13 件石英样品中 δD 值变化于 -128.5% ~ -81.0% ,平均值为 -105.2% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化于 9.0% ~ 12.3% ,平均值为 10.8% 。采用所测得的石英样品中流体包裹体均一温度平均值,利用石英-水分馏方程公式 $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^2 - 3.40$ [15],计算出流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值变化于 -2.0% ~ 6.5% ,平均值 2.5% 。1 件成矿晚阶段方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 15.0% (未测得 δD 值)。使用方解石-水分馏方程 $1000\alpha = 2.78 \times 10^6 T^2 - 3.39$ [16] 和同一样品方解石中流体包裹体均一温度平均值,计算出流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值为 8.2% 。

孔雀山矿段 13 件石英样品中 δD 值变化于 -119.1% ~ -73.0% ,平均值为 -100.9% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化于 9.5% ~ 12.4% ,平均值为 11.3% 。同样利用上述分馏方程公式计算,获得流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值介于 -2.8% ~ 7.8% ,平均值为 4.1% 。1 件成矿晚阶段方解石的 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 值为 -89.0% 。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 -4.8% ,对应的流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值为 -11.2% 。

5 讨论

5.1 成矿流体来源

表 3 所示,金鸡岭矿段 14 件成矿期的石英和方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 为 -2.0% ~ 8.2% , δD 为 -128.5% ~ -81% ;孔雀山矿段 15 件成矿期的石英和方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 为 -11.2% ~ 7.8% , δD 为 -119.1% ~ -73% 。从 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 关系图上(图 6)可以看出,金鸡岭矿段 13 件石英样品均落在岩浆水左下方与大气降水线之间,并且随着成矿作用的进行,逐渐向大气降水方向偏移,表明早期成矿流体主要以岩浆水为主,而后期成矿流体可能在上升过程中与地层中的大气降水相混合^[17-18]。

表 1 布敦化铜矿床硫化物的硫同位素分析结果

Table 1 Sulfur isotope composition of sulfides from the Budunhua Cu deposit

矿 段	样品号	采样位置	测定对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\%$	资料来源	
金鸡岭	BJS205	2#225 中段 7 线	黄铜矿 ^a	-0.10	本文	
	BJX210	2#225 中段 7 线	黄铜矿 ^a	0.80		
	BJX215	2#225 中段 7 线	黄铜矿 ^a	0.40		
	BJX216	2#225 中段 7 线	黄铜矿 ^a	2.20		
	BTV-27	—	黄铜矿 ^a	2.40		文献[2]
	BTV-18	—	黄铜矿 ^a	2.94		①
	BTV-20	—	黄铜矿 ^a	3.00		
	BTV-23	—	黄铜矿 ^a	2.75		
	BTV-29	—	黄铜矿 ^a	2.83		
	BJS205	2#225 中段 7 线	黄铁矿 ^a	0.40	本文	
	BJS210	2#225 中段 7 线	黄铁矿 ^a	2.10		
	BTV-12	—	黄铁矿 ^a	3.06	文献[2]	
	BTV-16	—	黄铁矿 ^a	4.93		
	BTV-19	—	黄铁矿 ^a	3.45		
	BTV-21	—	黄铁矿 ^a	1.35		
	BTV-22	—	黄铁矿 ^a	3.02		
	BTV-24	—	黄铁矿 ^a	2.68		
	BTV-28	—	黄铁矿 ^a	2.78		
	BTV-14	—	黄铁矿 ^a	3.10		
	BTV-27	—	磁黄铁矿 ^a	2.70		
BTV-13	—	磁黄铁矿 ^a	2.34			
BTV-15	—	磁黄铁矿 ^a	2.35	①		
BTV-25	—	磁黄铁矿 ^a	2.33			
BJX216	2#225 中段 7 线	磁黄铁矿 ^a	2.90	本文		
孔雀山	BKS107	1#-10 中段 20 线	黄铜矿 ^a	-4.90	本文	
	BKS109	1#-10 中段 20 线	黄铜矿 ^a	-3.50		
	BKX301	3#150 中段 13 线	黄铜矿 ^a	-2.00		
	BKX309	3#150 中段 13 线	黄铜矿 ^a	-3.60		
	BKX310	3#150 中段 13 线	黄铜矿 ^a	-1.50		
	BKX311	3#150 中段 13 线	黄铜矿 ^a	-1.60		
	77-t8	—	黄铜矿 ^a	-1.80	文献[2]	
	16	—	黄铜矿 ^a	-1.10		
	1	—	黄铜矿 ^a	-1.50	①	
	2	—	黄铜矿 ^a	-1.80		
	3	—	黄铜矿 ^a	-1.30		
	5	—	黄铜矿 ^a	0.70		
	15	—	黄铜矿 ^a	-0.70		
	19	—	黄铜矿 ^a	0.50		
	77-t6	—	黄铜矿 ^a	-1.70		
	77-t7	—	黄铜矿 ^a	-1.70		
	77-t9	—	黄铜矿 ^a	-1.40		
	77-t11	—	黄铜矿 ^a	-1.40		
	77-t14	—	黄铜矿 ^a	-1.70		
	JD06	—	黄铁矿 ^a	0.00	①	
JD08	—	黄铁矿 ^a	0.00			
JD11	—	黄铁矿 ^a	-0.60			
77-t1	—	黄铁矿 ^a	-1.30			
77-t2	—	黄铁矿 ^a	-1.30			
77-t3	—	黄铁矿 ^a	-1.40			
JD17	—	黄铁矿 ^a	-1.40			
JD20	—	黄铁矿 ^a	-0.60			
JD22	—	黄铁矿 ^a	-1.30			
JDt4	—	黄铁矿 ^a	0.50			
BKS109	1#-10 中段 20 线	磁黄铁矿 ^a	-4.50	本文		
BKX310	3#150 中段 13 线	磁黄铁矿 ^a	-0.80			
BKX301	3#150 中段 13 线	磁黄铁矿 ^a	-0.30			
JD13	—	磁黄铁矿 ^a	-1.00	文献[2]		
JD23	—	方铅矿 ^a	-1.40			

注：“—”表示“不详”；核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析测试。

①内蒙古地矿局 115 地质队. 内蒙古自治区科尔沁右翼中旗布敦化铜矿田隐伏铜矿成矿规律和成矿预测研究报告, 1994.

表 2 布敦化铜矿床硫化物的铅同位素分析结果
Table 2 Lead isotopic composition of ore sulfides from the Budunhua Cu deposit

矿段	原始编号	采样位置	测定对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	资料来源
金鸡岭	BJS205	2#225 中段 7 线	黄铜矿	18.315	15.571	38.217	
	BJX210	2#225 中段 7 线	黄铜矿	18.287	15.517	38.044	
	BJX215	2#225 中段 7 线	黄铜矿	18.333	15.579	38.247	
	BJS205	2#225 中段 7 线	黄铁矿	18.301	15.556	38.166	本文
	BJX215	2#225 中段 7 线	黄铁矿	18.274	15.510	38.022	
	BJS209	2#225 中段 7 线	方铅矿	18.307	15.560	38.180	
	BJS205	2#225 中段 7 线	方铅矿	18.282	15.528	38.079	
	806-125	—	方铅矿	18.290	15.537	38.113	文献[2]
	BK108	—	方铅矿	18.276	15.491	37.959	文献[2]
	BK32	—	方铅矿	18.248	15.476	37.911	
孔雀山	BKS107	1#-10 中段 20 线	黄铜矿	18.344	15.511	38.097	
	BKS109	1#-10 中段 20 线	黄铜矿	18.294	15.518	38.045	本文
	BKX301	3#150 中段 13 线	黄铜矿	18.292	15.509	38.015	
	BKX309	3#150 中段 13 线	黄铜矿	18.308	15.509	38.022	

注:“—”表示“不详”;中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质开放研究实验室分析测试。

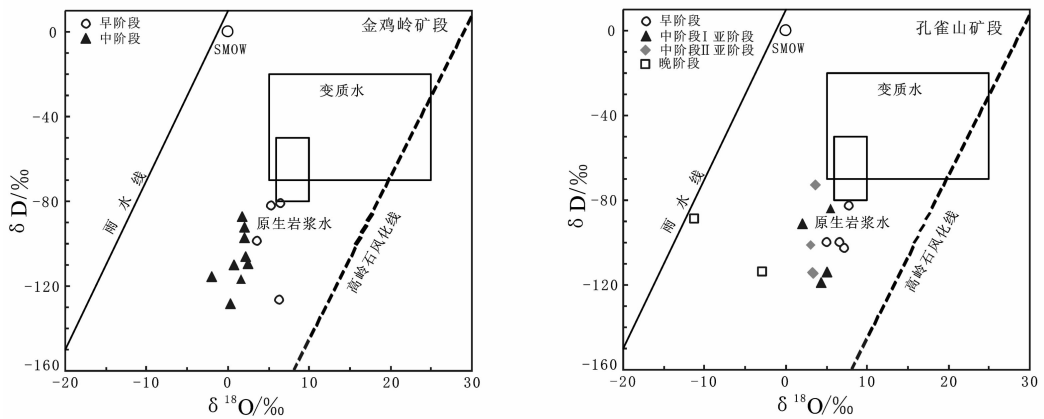


图 6 布敦化铜矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} - \delta\text{D}$ (底图据参考文献[19])

Fig.6 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} - \delta\text{D}$ plot of the Budunhua Cu deposit (after reference [19])

孔雀山矿段成矿早—中阶段石英样品均落在岩浆水左下方与大气降水线之间,紧邻岩浆水的部位,2件成矿晚阶段的石英与方解石样品明显偏离岩浆水或变质水,而紧靠大气降水线,为典型的大气降水成因。可以认为,孔雀山矿段成矿流体早阶段以岩浆水

为主,随着矿化的进行,成矿晚阶段以大气降水为主。

综上所述,布敦化铜矿床金鸡岭矿段与孔雀山矿段的成矿流体主要以岩浆水为主,但也有大气降水不同程度的参与。同时,矿石 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值与本区中生代成矿时期大气降水的 δD 值(-149‰)^[2]较为

表 3 布敦化铜矿床氢、氧同位素组成
Table 3 Hydrogen and oxygen isotopic data of the Bundunhua Cu deposit

矿 段	阶 段	样品编号	采样位置	测定 矿物	矿物 温度	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	资料来源
						V-SMOW /‰	V-SMOW /‰	/‰	
I		BJL401-1	2#225 中段	石英	336.8	9.0	-115.5	3.3	本文
		BTOH-2	—	硅化石英	350.0	11.7	-126.8	6.3	
		ZK9209-411	ZK9209	石英	361.0	10.4	-82.0	5.4	文献[2]
		ZK9209-197	ZK9209	石英	337.0	12.2	-81.0	6.5	
金 鸡 岭	I	BJL101	2#225 中段	石英	225.8	11.8	-116.7	1.6	
		BJL101-1	2#225 中段	石英	240.7	11.2	-87.0	1.8	
		BJL101-3	2#225 中段	石英	233.2	12.3	-109.6	2.5	
		BJL201	2#225 中段	石英	229.2	12.1	-97.0	2.1	
	II	BJL301	2#225 中段	石英	242.0	10.0	-110.0	0.7	本文
		BJL301-1	2#225 中段	石英	244.6	11.4	-106.1	2.2	
		BJL301-3	2#225 中段	石英	243.4	9.6	-128.5	0.3	
		BJL301-4	2#225 中段	石英	207.4	9.2	-115.7	-2.0	
		BJL401	2#225 中段	石英	286.4	9.5	-92.0	2.1	
		III	BTC13-1	—	方解石	250.0	15.0		8.2
孔 雀 山	I	BK49-3	—	石英	447.0	10.9	-83.0	7.8	
		C-8-3	190 中段 33 线 14 号矿脉	石英	342.0	10.5	-100.0	5.0	文献[2]
		C-5	190 中段 13 线	石英	399.0	10.7	-100.0	6.6	
		BKL101	1#-10 中段	石英	366.6	12.1	-103	7.2	本文
	II-1	BKL201	1#-10 中段	石英	299.9	12.4	-84.0	5.5	
		BKL201-1	3#150 中段	石英	275.0	12.2	-119.1	4.3	本文
		BKL201-2	3#150 中段	石英	287.5	12.4	-114.0	5.0	
		BKL201-4	3#150 中段	石英	269.8	10.1	-91	2	
		BKL301	3#150 中段	石英	258.6	11.6	-101.2	3.0	
		II-2	BKL301-1	3#150 中段	石英	273.0	11.3	-115.2	3.4
BKL301-2	3#150 中段		石英	264.6	11.6	-115.1	3.3		
BK31-5	3#150 中段		石英	273.0	11.5	-73.0	3.6	文献[2]	
BKL401	3#150 中段		石英	191.0	9.5	-113.7	-2.8	本文	
III	C-23	150 中段 17 线	方解石脉	260.0	-4.8	-89.0	-11.2	文献[2]	
	TTB-2	—	碳酸钙	225.5	17.0		9.2	文献[1]	

注：“—”表示“不详”；中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质开放研究实验室分析测试。

接近,可以推测为,当矿区深来源的成矿热液在不断向上运移的过程中,不同程度地与围岩地层中的大气降水发生了明显的同位素交换反应^[9],致使含矿热液流体具有较低的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

5.2 成矿物质来源

5.2.1 硫的来源

硫是绝大多数矿床中最重要的成矿元素之一,硫同位素的天然丰度高(4.2%),常用来研究地质作用中硫的来源和成岩成矿的物理化学条件^[20]。通过硫同位素的分析判断成矿物质的来源,可以为解决矿床的成因问题提供重要依据^[21]。在应用硫同位素组成探讨成矿物质来源时,首先应确定矿源的硫同位

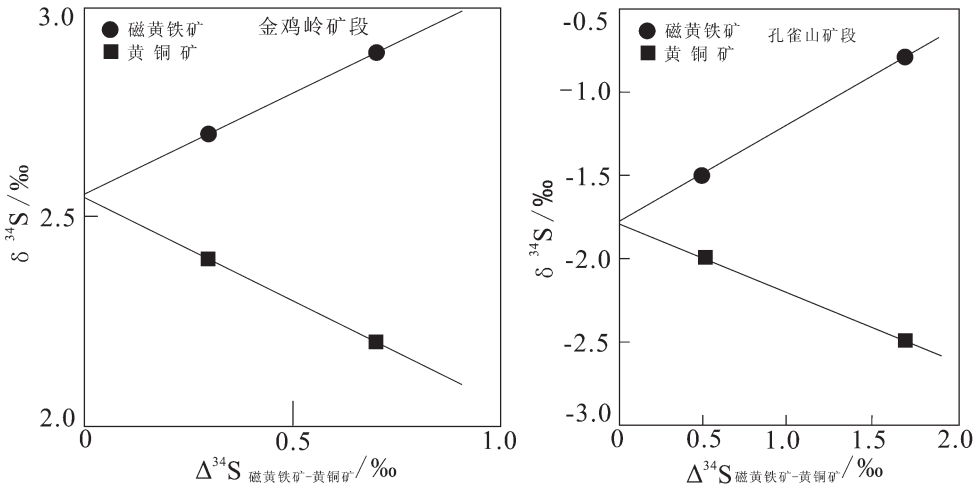


图 7 金鸡岭和孔雀山矿段 $\Delta^{34}\text{S}$ 磁黄铁矿-黄铜矿与 $\delta^{34}\text{S}$ 关系图
 Fig.7 Relationship between $\Delta^{34}\text{S}_{\text{PbO-Cp}}$ and $\delta^{34}\text{S}$ of the Jinjiling and Kongqeshan ore blocks

素组成。事实上, 确定矿床溶液的总硫同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$) 是判断硫源的主要依据^[21]。

在实验室得到含硫矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值后, 通常采用平克尼-拉夫特法 (高温平衡外推法, Pinckney 和 Rafter, 1972)^①, 确定成矿溶液总硫同位素组成。分别选择金鸡岭与孔雀山矿石矿物部分 $\delta^{34}\text{S}$ 结果, 用平克尼-拉夫特法, 对磁黄铁矿-黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值作图 (图 7), 获得两个矿段的热液总硫同位素组成大致为 +2.54‰~+2.60‰ 和 -1.84‰~-1.71‰, 反映出两个矿段的硫同位素变化范围均较小, 且都在源于深部且与岩浆作用有关硫化物的硫同位素 (0±3‰) 范围内^[23], 表明金鸡岭铜矿及孔雀山铜矿成矿物质主要来自地球深部, 且与岩浆作用有关。在硫同位素频率直方图 (图 8) 上, 金鸡岭矿段及孔雀山矿段 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值分布范围为 +2‰~+3‰ 和 -2‰~-1‰ 呈塔式分布特征, 亦表明硫的来源较为单一, 硫同位素主要来源于地幔, 基本不受地壳污染。

5.2.2 铅的来源

通常认为, 铅同位素源区特征值, 尤其是 μ 值 ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) 的变化能提供地质体经历地质作用的信息, 反映铅的来源。具有高 μ 值 (大于 9.58) 的铅或者位于零等时线右侧的放射性成因铅通常被认为是来自 U、Th 相对富集的上部地壳物质^[24-25]。从表 4 可以看出, 布敦化铜矿床矿石铅同位素 μ 值相对集

中 (9.24~9.43, 平均值为 9.33), 高于地幔原始铅 μ 值范围, 但均低于 9.58, 表明铅源不具有上地壳物质的特征。 ω ($^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$) 值介于 34.11~35.96, 平均值为 34.99, 均低于平均地壳铅的 ω 值 (36.84), 具有幔源铅的特征。通常, 具有低 μ 值的铅可能来自下地壳或上地幔^[26], 低 μ 值和低 ω 值被认为是上地幔源^[25,27]。矿石铅的 Th/U 比值变化于 3.57~3.69, 平均值为 3.62, 与地壳的 Th/U 比值 (约为 4) 基本相当, 揭示了成矿物质的壳源特征。因此, 金鸡岭和孔雀山矿段矿石铅同位素组成低 μ 、低 ω 值的特征指示了矿石铅来源于富 Th、亏 U 的源区, 整体上具有上地幔来源的特征, 并混染有少量地壳物质。

为了进一步探讨金鸡岭及孔雀山矿段矿石铅的来源, 将两个矿段矿石的铅同位素组成投影到铅同位素构造环境演化图解中 (图 9), 金鸡岭矿段与孔雀山矿段投点相近, 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 金鸡岭矿段与孔雀山矿段所有样品均投点于地幔与造山带之间; 在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 两个矿段所有样品均投于造山带演化线附近, 反映了铅源于与造山作用有关的深源。由于造山作用本身有地壳物质的混染, 因此, 推测本区两个铜矿段铅成矿物质主要来源于地幔, 并有地壳铅的混染。

朱炳泉等^[28]在广泛搜集世界各地不同时代和成因的铅同位素资料基础上, 根据构造环境与成因不

① 中国地质调查局同位素地球化学开放研究实验室. 稳定同位素地球化学基础, 2001.

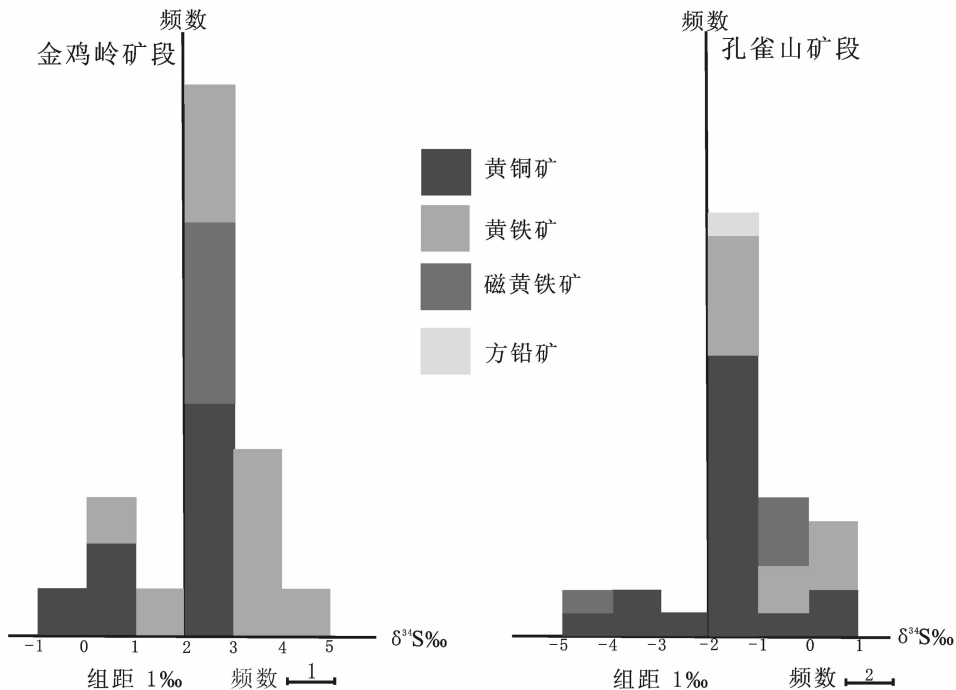


图 8 布敦化铜矿床的硫同位素组成直方图

Fig.8 Histogram of sulfur isotopic compositions of ores from the Budunhua Cu deposit

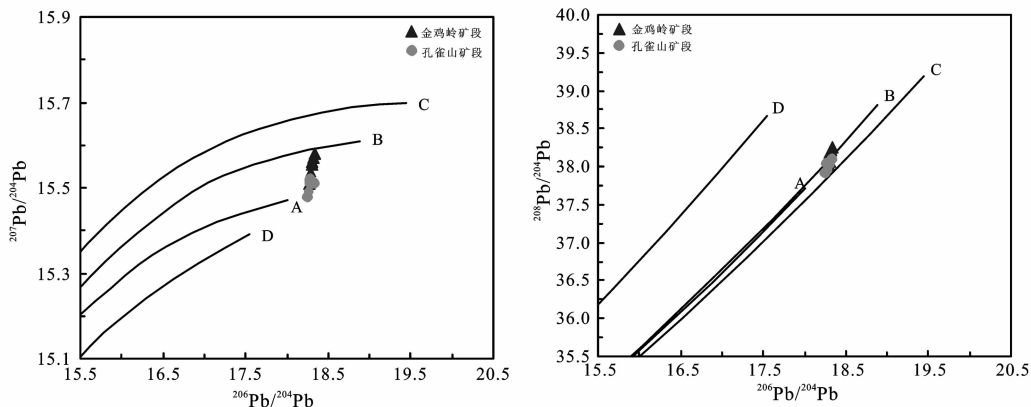


图 9 布敦化铜矿床矿石铅同位素构造环境演化图解(底图据参考文献[24])

A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳

Fig.9 Diagram showing evolutionary tectonic settings of Pb isotope from the Budunhua Cu deposit (after Reference [24])

A—Mantle; B—Orogenic belt; C—Upper crust; D—Lower crust

同, 提出了将铅的 3 种同位素表示成同时代地幔的相对偏差 $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 、 $\Delta \gamma$, 并通过 $\Delta \beta - \Delta \gamma$ 成因分类图解(图 10), 追踪矿石铅的源区的方法。该模式消除了时间因素的影响, 理论上比那些全球性的演化模式有更好的示踪意义^[28]。本文通过路远发^[29] Geokit 软件计算得到计金鸡岭矿段及孔雀山矿段矿石铅与同时代地幔铅的相对偏差 $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 、 $\Delta \gamma$ (表

4), 并投影到铅同位素的 $\Delta \beta - \Delta \gamma$ 成因分类图解(图 10)上, 金鸡岭矿段除 1 件样品落在地幔源铅范围内外, 其他样品均落在上地壳与地幔混合的俯冲带岩浆作用成因铅同位素源区, 而孔雀山矿段, 样品主要落于地幔源铅区, 少部分落于上地壳与地幔混合的俯冲带铅区, 且这两个矿段样品投入范围均靠近地幔源铅、造山带铅和上地壳与地幔混合俯冲带

表 4 布敦化铜矿床硫化物的铅同位素组成的相关参数

Table 4 Lead isotopic characteristic parameters of ore sulfides from the Budunhua Cu deposit

矿段	原始编号	测定对象	t (Ma)	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	资料来源
金鸡岭	BJS205	黄铜矿 ⁺	200.3	9.42	35.86	3.68	70.5	16.29	28.53	本文
	BJX210	黄铜矿 ⁺	152.8	9.31	34.81	3.62	65.18	12.56	21.82	
	BJX215	黄铜矿 ⁺	197.1	9.43	35.96	3.69	71.3	16.8	29.2	
	BJS205	黄铁矿 ⁺	191.8	9.39	35.59	3.67	69.02	15.28	26.79	
	BJX215	黄铁矿 ⁺	153.5	9.3	34.73	3.61	64.48	12.11	21.26	
	BJS209	方铅矿 ⁺	192.4	9.4	35.65	3.67	69.41	15.54	27.19	
	BJS205	方铅矿 ⁺	170.5	9.34	35.08	3.63	66.26	13.36	23.53	
孔雀山	806-125	方铅矿 ⁺	176.0	9.35	35.26	3.65	67.15	13.97	24.68	文献[2]
	BK108	方铅矿 ⁺	127.6	9.26	34.29	3.58	62.61	10.76	18.46	文献[2]
	BK32	方铅矿 ⁺	129.2	9.24	34.11	3.57	61.11	9.79	17.24	
	BKS107	黄铜矿 ⁺	102.6	9.3	34.68	3.61	64.66	11.96	21.09	本文
	BKS109	黄铜矿 ⁺	148.9	9.32	34.79	3.61	65.29	12.61	21.68	
	BKX301	黄铜矿 ⁺	138.8	9.3	34.6	3.6	64.4	11.98	20.44	
	BKX309	黄铜矿 ⁺	126.9	9.3	34.54	3.59	64.42	11.93	20.12	

注:核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析测试; $\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$, $\omega = {}^{232}\text{Th}/{}^{204}\text{Pb}$, $\alpha = {}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$, $\beta = {}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$, $\gamma = {}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$, $\Delta\alpha = (\alpha / \alpha_M(t) - 1) \times 1000$, $\Delta\beta = (\beta / \beta_M(t) - 1) \times 1000$, $\Delta\gamma = (\gamma / \gamma_M(t) - 1) \times 1000$; $\alpha_M(t)$, $\beta_M(t)$, $\gamma_M(t)$ 为 t 时地幔值。

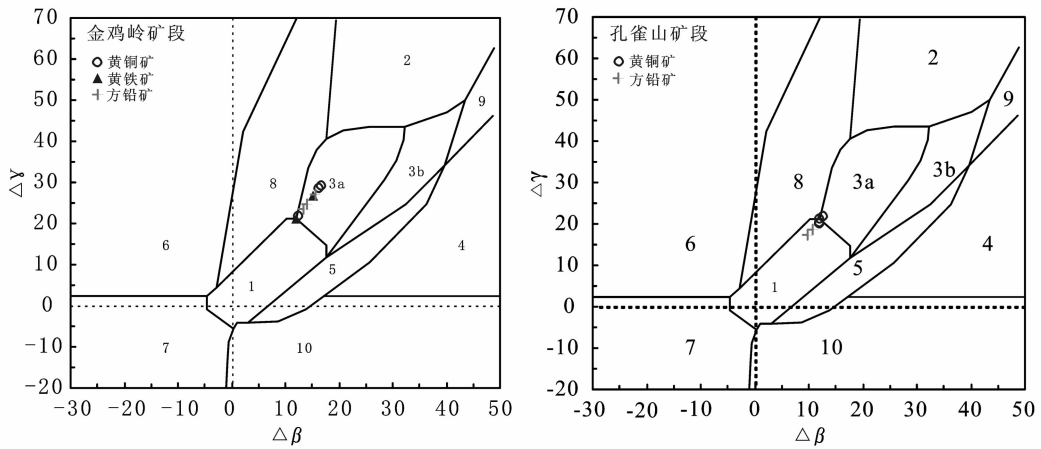


图 10 布敦化铜矿床样品铅同位素的 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解 (底图据参考文献[28])

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—深变质作用下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅

Fig.10 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ diagram of genetic classification of ore lead isotopes from the Budunhua Cu deposit (after reference [28])

1—Mantle-derived lead; 2—Upper crust lead; 3.Mixed lead of upper crust and mantle subduction zones (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 ancient shale; 10—Retrograde metamorphic lead

铅三者的边界,因此,这两个矿段的矿石铅应属壳幔混合铅。这一特征与 Zartman 的铅构造模式中样品的分布特征基本一致,表明本区成矿物质来源具有

壳幔混合的特点。

5.3 成矿机制

基于上述 H、O、S 和 Pb 同位素地球化学对成

矿流体来源和演化过程的示踪,结合已有的区域地质演化研究资料,可以将岩浆、热液的形成过程与成矿作用联系起来,探讨布敦化铜矿床的形成机制。

本区经历了漫长的地质演化,区域构造十分复杂。在晚泥盆世—早石炭世,西伯利亚古板块与中朝古板块发生拼合的过程中产生了本区的基底构造,至二叠纪末这种基底构造基本格架形成之后^[30-32],侏罗纪中晚期本区进入了滨太平洋大陆边缘强烈构造岩浆活动阶段,整体挤压、局部拉张,壳幔强烈相互作用^[33-34],整个中国东部进入滨西太平洋构造域,区域构造格局发生大转换,在此过程中,软流圈物质上涌,引发俯冲洋壳的局部重熔,幔源岩浆携带流体(H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、卤素等挥发分和有用物质(Au、Ag、Cu等))底侵至地壳底部^[35],与被加热熔融的下地壳物质以不同比例混合形成同熔型岩浆,经进一步的上侵—分异而衍生为富含铜的岩浆^[36],沿着活动断裂向浅部运移,岩体斑状结构表明岩浆上升速度很快,这将利于携带流体和矿质一起上升^[37],岩浆到达一定位置,流体将会因为矿物结晶和/或系统减压发生过饱和而出溶^[38-42],布敦化矿床两个矿段H、O同位素组成表明,成矿流体出溶后不久就与围岩中的大气降水发生了交换,流体混合造成原始流体物理化学平衡被打破,流体的温度下降、盐度降低,而使得岩浆流体中的酸性组分浓度降低,流体中矿质的溶解度大大降低^[43]。前人研究认为^[44-46],铜在流体中主要以 $CuCl_{(aq)}$ 或 $CuCl_2$ 等络合物的形式存在和迁移,Cu的溶解度与Cl⁻的浓度成正比关系,流体温度的下降、压力降低、pH值升高、盐度降低,导致流体中的酸性组分浓度降低,使流体中矿质的溶解度大大降低,而造成黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物的大量沉淀,形成了铜的大规模富集。

综上所述,布敦化矿床大规模成矿作用主要是由流体混合作用所致。布敦化矿床从岩浆到流体均显示出壳幔双重来源的特征,指示壳幔作用强烈的地区利于矿床的形成,为远景找矿提供重要依据。

6 结 论

布敦化铜矿床金鸡岭矿段与孔雀山矿段矿石的氢、氧同位素结果均反映出成矿流体主要来源于岩浆水,并在成矿后期有围岩中大气降水的不同份额的参与;硫、铅同位素反映出成矿物质具深源特征,矿石硫具有深部硫的特点,铅为壳幔混合铅。因此,该矿床

的成矿作用发生于开放体系之中,成矿物质来源为深部幔源物质混合壳源物质。结合区域地质演化资料认为,布敦化矿床两个矿段的成矿作用均是由流体混合而导致黄铜矿等金属硫化物的大量沉淀。

致谢:野外工作期间得到精诚矿业吕玉山、李振宏高级工程师和各级领导的大力支持与帮助;室内测试工作得到核工业地质研究所刘牧等的支持;研究工作得到中国地质科学院矿产资源研究所盛继福研究员的有益指导,两位审稿专家给论文提出了许多宝贵的修改意见,在此,一并致谢!

参考文献(References):

- [1] 王湘云. 内蒙古布敦花铜矿床地质特征及矿床成因探讨 [J]. 内蒙古地质, 1994(增刊1):63-76.
Wang Xiangyun. Geological feature and metallogenic approach of Budunhua Copper Deposit, Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Geology, 1994 (Supp.1):63-76(in Chinese with English abstract).
- [2] 盛继福, 傅先政. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M]. 北京:地震出版社, 1999:169-181.
Sheng Jifu, Fu Xianzheng. Metallogenic Environment and Geological Characteristics of Copper-Polymetallic Ore Deposits in Middle Part of Da Hinggan Mts [M]. Beijing:Seismological Press, 1999:169-181(in Chinese).
- [3] 肖丙建. 内蒙古自治区科右中旗布敦花铜矿床地质特征及成因 [J]. 地质找矿论丛, 2008, 23(1):27-31.
Xiao Bingjian. Geological characteristics and genesis of Budunhua copper deposit in middle Ke Erqin County, Inner Monggolia [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2008, 23(1):27-31(in Chinese with English abstract).
- [4] 王湘云. 内蒙古布敦花岩浆杂岩体成岩成矿特征初析 [J]. 内蒙古地质, 1997, 2:29-38.
Wang Xiangyun. A dicussion on metallogenic characteristics of magmatic complex in Budunhua, Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Geology, 1997, 2:29-38 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘城先. 内蒙布敦化铜矿成矿系列和成矿模式 [J]. 长春工程学院学报, 2001, 2(4):30-32.
Liu Chengxian. The mineralization series and models of Budunhua copper mine Inner Mongolia [J]. Journal of Changchun Institute of Technology, 2001, 2(4):30-32(in Chinese with English abstract).
- [6] 白大明, 刘光海. 黄岗梁—乌兰浩特铜多金属成矿带区域综合找矿模式[J]. 物探与化探, 1996, 20(6):444-454.
Bai Daming, Liu Guanghai. Regional integrated ore-prospecting model for the Huanggangliang—Ulan Hot copper-polymetallic ore deposit belt [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1996, 20(6):444-454 (in Chinese with English abstract).
- [7] 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(33):85-93.

- Ren Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6 (3):85-93(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘建明, 张锐, 张庆洲. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地质前缘*, 2004, 11(1):269-277.
- Liu Jianming, Zhang Rui, Zhang Qingzhou. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 1(1):269-277(in Chinese with English abstract).
- [9] 赵一鸣, 张德全. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M]. 北京:地震出版社, 1997:1-318.
- Zhao Yiming, Zhang Dequan. Metallogeny and Prospective Evaluation of Copper-polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountains and Its Adjacent Regions [M]. Beijing:Seismological Press, 1997:1-318(in Chinese).
- [10] 王湘云. 布敦花铜矿床蚀变交代岩特征及其找矿意义[J]. *内蒙古地质*, 1995(增刊 1):46-53.
- Wang Xiangyun. Feature of metasomatic altered rock and its prospecting implications of budunhua copper deposit [J]. *Inner Mongolia Geology*. 1995 (Supp.1):46-53 (in Chinese with English abstract).
- [11] Clayton R N, Mayeda T K. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1963, (27):43-52.
- [12] Coleman M L, Sheppard T J, Durham J J, et al. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 1982, 54:993-995.
- [13] 周刚, 韩东南, 邓吉牛. 新疆可可塔勒铅锌矿床同位素地球化学研究[J]. *矿产与地质*, 1998, 1(12):33-38.
- Zhou Gang, Han Dongnan, Deng Jimiu. Study of isotope geochemistry on the Keketale lead-zinc deposit, Xinjiang [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1998, 1 (12):33-38 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1985, 152-185.
- 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 Publishing House, 1985:23-151(in Chinese).
- [15] Clayton R N, Mayeda T K, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *Geophys. Res.*, 1972, 77: 3057-3067.
- [16] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. *J. Chem. Phys.*, 1969, 51:5547-5558.
- [17] 王义天, 张文智, 王磊, 等. 新疆东天山红石金矿床成矿流体和成矿物质来源示踪[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8):1998-2006.
- Wang Yitian, Zhang Wenzhi, Wang Lei, et al. Tracing the sources of ore-forming fluids and materials of the Hongshi gold deposit in the Eastern Tianshan, Xinjiang, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (8):1998-2006(in Chinese with English abstract).
- [18] 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 等. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床的成矿流体及成矿作用[J]. *矿床地质*, 2008, 27(6):659-680.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Chai Fengmei, et al. Ore-forming fluids and metallogenesis of Mengku iron deposit in Altay, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(6):659-680(in Chinese with English abstract).
- [19] Sheppard S M F. Identification of the origin of ore-forming solutions by the use of stable isotopes [J]. *Inst. Ming Metallurgy*, 1977:25-41.
- [20] 牟保全. 元素地球化学[M]. 北京:北京大学出版社, 1999:1-227.
- Mo Baolei. *Element Geochemistry* [M]. Beijing:Peking University Press, 1999:1-227.
- [21] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社. 1988: 1-166.
- Wei Juying, Wang Guanyu. *Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:1-166(in Chinese).
- [22] 丰成友, 丰耀东, 张德全, 等. 闽中梅仙式铅锌银矿床矿质来源的硫、铅同位素示踪及成矿时代[J]. *地质学报*, 2007, 81(7):906-916.
- Feng Chengyou, Feng Yaodong, Zhang Dequan, et al. Sulfur and lead isotope tracing for sources of ore-forming material and ore-forming age of the Meixian-style Pb-Zn (-Ag) deposits in the central Fujian rift, south east China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(7):906-916(in Chinese with English abstract).
- [23] Chaussidon M, Lorand J P. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (N. E. Pyrenees, France):An ion microprobe study [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, 54:2835-2846.
- [24] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75:135-162.
- [25] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. *地质地球化学*, 2002, 30(3):73-81.
- Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: a review [J]. *Geology - Geochemistry*, 2002, 30(3):73-81(in Chinese with English abstract).
- [26] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 26:207-221.
- [27] Kamona A F, Lévêque J, Friedrich G, et al. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damara-Lufilian fold belt of central Africa [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34:273-283.
- [28] 朱炳泉, 李献华, 戴谟, 等. 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, 1998:1-330.
- Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Mo, et al. *The Theory and Application of Isotopic System in Earth Sciences* [M]. Beijing: Science Press, 1998:1-330(in Chinese).
- [29] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5):459-464.
- Lu Yuanfa. *GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft excel* [J].

- Geochimica, 2004, 33(5):459-464(in Chinese with English abstract).
- [30] 徐志刚, 张德全. 内蒙古东南部铜多金属矿床成矿构造背景. 大兴安岭及邻区铜多金属矿床论文集 [M]. 北京: 地震出版社, 1993:22-41.
- Xu Zhiqiang, Zhang Dequan. Ore-forming Tectonic Setting Background of Copper-polymetallic Deposits in Southeastern Inner Mongolia. Symposium of Copper-polymetallic Deposits in Daxinganling and Adjacent Areas [M]. Beijing: Seismological Press, 1993:22-41(in Chinese)
- [31] 王长明, 张寿庭, 邓军. 大兴安岭南段铜多金属矿成矿时空结构 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(5):478-484
- Wang Changming, Zhang Shouting, Deng Jun. The metallogenic space-time structure of copper-polymetallic deposits in the southern segment of Da Hinggan Mountains, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(5):478-484(in Chinese with English abstract).
- [32] 王长明, 张寿庭, 邓军, 等. 内蒙古黄岗梁锡铁多金属矿床层状砂卡岩的喷流沉积成因 [J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(5):409-417.
- Wang Changming, Zhang Shouting, Deng Jun, et al. The exhalative genesis of the stratabound skarn in the Huanggangliang Sn-Fe polymetallic deposit of Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2007, 26(5):409-417(in Chinese with English abstract).
- [33] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 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, 2005, 21(1):169-88.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1):169-188(in Chinese with English abstract).
- [34] Jingwen Mao, Franco Pirajno, Nigel Cook. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings — An introduction to the special issue [J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43:1-7.
- [35] 刘洪文, 邢树文, 周永昶. 吉南地区斑岩—热液脉型金多金属矿床成矿模式 [J]. 地质与勘探, 2002, 38(2):28-32.
- Liu Hongwen, Xing Shuwen, Zhou Yongchang. The metallogenic model of the porphyry-hydrothermal gold-multiple metallogenic deposits in south Jilin Province [J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(2):28-32(in Chinese with English abstract).
- [36] 王京彬, 王玉往, 王莉娟. 大兴安岭中南段铜矿成矿背景及找矿潜力 [J]. 地质勘探, 2000, 36(5):1-4.
- Wang Jingbin, Wang Yuwang, Wang Lijuan. Copper Metallogenic Setting and Prospecting Potential in the Middle-Southern Part of Da Hinggan Mountains [J]. Geology and Prospecting, 2000, 36(5):1-4(in Chinese with English abstract).
- [37] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004:1-487.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004:1-487(in Chinese).
- [38] Loucks R R, Mavrogenes J A. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions [J]. Science, 1999, 284:2159-2163.
- [39] Hedenquist J w, Lowenstern J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits [J]. Nature, 1994, 370:519-527.
- [40] 朱永峰, 艾永富, 赵永超. 关于岩浆热液矿床形成的几个问题: 以斑岩型矿床为例 [J]. 矿床地质, 1995, 14(4):380-384
- Zhu Yongfeng, Ai Yongfu, Zhao Yongchao. Some problems concerning the formation of magmatic hydrothermal deposits [J]. Mineral Deposit, 1995, 14(4):380-384.
- [41] Shinohara H, Hedenquist J W. Constraint on magma degassing beneath the Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Philippines [J]. Journal of Petrology, 1997, 38:1741-1752.
- [42] Hedenquist J W, Arribas A, Reynolds T J. Evolution of an intrusion—Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines [J]. Economic Geology, 1998, 93:373-404.
- [43] 武广, 刘军, 钟伟, 等. 黑龙江省铜山斑岩铜矿床流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 2009, 25(11):2995-3006.
- Wu G, Liu Jun, Zhong Wei, et al. Fluid inclusion study of the Tongshan porphyry copper deposit, Heilongjiang Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11):2995-3006(in Chinese with English abstract).
- [44] 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶, 等. 德兴斑岩铜矿 [J]. 北京: 地质出版社, 1983:1-336.
- Zhu Xun, Hang Chongke, Rui Zongyao, et al. The Geology of Dexing Porphyry Copper Ore Field [J]. Beijing: Geological Publishing House, 1983:1-336(in Chinese with English abstract).
- [45] Candela PA, Holland HD. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal system: The origin of porphyry-type ore deposits [J]. Economic Geology, 1986, 81:1-29.
- [46] 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 西藏冈底斯三处斑岩铜矿床流体包裹体及成矿作用研究 [J]. 矿床地质, 2005, 24(4):398-408
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Li Zhenqing. Fluid inclusions and ore-forming processes of three porphyry copper deposits in Gangdese belt, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(4):398-408(in Chinese with English abstract).

H-O-S-Pb isotopic components of the Budunhua Cu deposit in the middle-south part of the Da Hinggan Mountains and their implications for the ore-forming process

WU Xin-li¹, MAO Jing-wen^{1,2}, ZHOU Zhen-hua², OU'YANG He-gen¹

(1. Faculty of Earth Sciences and Resources, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Budunhua Cu deposit is a porphyry-hydrothermal vein type composite deposit in the middle-south part of the Da Hinggan Mountains. The deposit consists of the southern Jinjiling porphyry Cu ore block and northern Kongqeshan hydrothermal vein-type Cu ore block. Based on a detailed analysis of geological characteristics and a study of hydrogen, oxygen, sulfur, and lead isotopes in hydrothermal minerals, this paper has discussed the origin of ore-forming fluid and materials and genesis of the Budunhua deposit. Hydrogen and oxygen isotope analyses indicate that the ore-forming fluid in the early ore-forming stage in Jinjiling and Kongqeshan ore blocks was mainly magmatic water, whereas that in the late ore-forming stage was probably a mixed fluid of magmatic and meteoric water. Sulfur isotope analyses show that the Jinjiling ore block is relatively rich in ³⁴S, with sulfur isotope composition of ore-forming fluid being +2.54~+2.60‰, while the Kongqeshan ore block is relatively depleted in ³⁴S, with sulfur isotope composition of ore-forming fluid being -1.84~-1.71‰. The sulfur isotope composition of the two ore blocks suggest a deep-seated source, and the lead isotope results display crust-mantle mixing characteristics closely related to magmatism. With the regional geological evolution history of the middle-south part of the Da Hinggan Mountains as a premise, the mineralization of the Jinjiling and the Kongqeshan Cu ore blocks in the Budunhua Cu deposit should be mainly related to fluid mixing which led to the precipitation of metal sulfides.

Key words: stable isotope; ore-forming fluid; ore-forming materials; Budunhua Cu deposit; middle-south part of the Da Hinggan Mountains

About of the first author: WU Xin-li, female, born in 1986, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit; E-mail: wuxinli1122@163.com.