

云南白牛厂银多金属矿床硫同位素组成 及滇东南多金属矿找矿远景

李开文^{1,2} 张 恺³ 郭君功⁴ 刘 坤¹ 方怀宾¹ 张 乾⁵

(1. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质勘查院, 河南 郑州 450000; 4. 河南省地质科学研究所, 河南 郑州 450001; 5. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘 要 白牛厂银多金属矿床位于滇东南多金属成矿带中部, 该矿床的银、锡、铅、锌储量达到了大型—超大型规模, 同时伴生丰富的分散元素。由于该矿床成因争议较大, 直接制约了进一步的勘探和开发。根据新开采矿段矿石矿物的硫同位素数据, 系统研究了白牛厂矿床的硫同位素组成特征。结果表明: 白牛厂矿床矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较小, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $2.5\text{‰}\sim 4.0\text{‰}$, 磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $2.7\text{‰}\sim 3.9\text{‰}$, 闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $2.9\text{‰}\sim 4.3\text{‰}$, 方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.5\text{‰}\sim 2.3\text{‰}$, 黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $3.4\text{‰}\sim 4.3\text{‰}$ 。通过与赋矿地层中硫化物及与成因密切的花岗岩体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值进行对比, 显示出白牛厂矿床的硫主要由岩浆作用提供, 为岩浆热液型矿床。结合个旧和都龙多金属矿床的地质研究成果进一步分析认为, 在滇东南地区围绕晚白垩世花岗岩体及外缘为寻找多金属矿产的有利地段。

关键词 银多金属矿床 硫同位素 岩浆作用 岩浆热液型矿床 找矿远景

中图分类号 P611, P612 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2018)-10-138-08

DOI 10.19614/j.cnki.jsks.201810024

Sulfur Isotopic Composition of Bainiuchang Ag-polymetallic Deposit and the Prospecting Prospective for Polymetallic Deposit of Southern Yunnan Province

Li Kaiwen^{1,2} Zhang Kai³ Guo Jungong⁴ Liu Kun¹ Fang Huaibin¹ Zhang Qian⁵

(1. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory for Metal Mineral Ore-forming Geological Process and Utilization of Resource, Zhengzhou 450001, China; 3. The Second Geological Survey Institute of Henan Bureau of Geology and Mineral Resources, Zhengzhou 450000, China; 4. Henan Geological Science Research Institute, Zhengzhou 450001, China; 5. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract Bainiuchang Ag-polymetallic Deposit is located at the central polymetallic ore belt of Southeast Yunnan, the associated mineral resources reserves of Ag, Sn, Pb and Zn are of the deposit are large or super large scale, and it is accompanied by abundant disperse elements. Due to the genesis of the deposit is controversial, further exploration and development are restricted. According to the S isotopic composition of Bainiuchang Deposit is systematically studied based on the latest S isotopic data of the ore minerals of the new mining section of the deposit. The study results show that the variation scope of the $\delta^{34}\text{S}$ values of ore minerals of Bainiuchang Deposit is small, $\delta^{34}\text{S}$ value for pyrite is from 2.5‰ to 4.0‰ , $\delta^{34}\text{S}$ value of pyrrhotite is from 2.7‰ to 3.9‰ , $\delta^{34}\text{S}$ value of sphalerite is from 2.9‰ to 4.3‰ , $\delta^{34}\text{S}$ value of galena is from 1.5‰ to 2.3‰ , $\delta^{34}\text{S}$ value of chalcopyrite is from 3.4‰ to 4.3‰ . By the comparison of the $\delta^{34}\text{S}$ values of the sulfides from ore-hosting strata and granite, it is show that the sulfur in Bainiuchang Deposit is mainly derived from magmatism, it belongs to magmatic hydrothermal deposit. Based on recently geological study results of Gejiu and Dulong polymetallic deposits, it is show that granitoids of Late Cretaceous and its periphery area are the favorable locations for the prospecting areas for polymetallic deposit in Southern Yunnan Province.

Keywords Ag-polymetallic deposit, Sulfur isotopic, Magmatism, Magmatic hydrothermal deposit, Prospecting prospective

收稿日期 2018-08-12

基金项目 国家自然科学基金项目(编号:40872074)。

作者简介 李开文(1984—),男,工程师,博士。通讯作者 张 恺(1991—),男,助理工程师。

• 138 •

白牛厂银多金属矿床位于滇东南锡多金属成矿带,与个旧、都龙多金属矿床共同构成了滇东南三大多金属矿床,并且其各自伴生一个大的花岗岩体。其中,白牛厂多金属矿床的银、锡、铅、锌资源量达到了大型—超大型规模,伴生有丰富的分散元素In、Cd、Ga、Ge等,并且深部勘探仍在进行中^[1]。目前,白牛厂银多金属矿床成因主要存在岩浆热液成因^[2]、海底热水喷流沉积成因^[3]、岩浆热液叠加后期改造成因^[4]、热水喷流沉积叠加岩浆热液叠加改造成因^[5]等4种观点。白牛厂矿床资源储量巨大,并且具有较好的找矿前景,由于该矿床成因存在争议,严重制约了进一步的勘查与找矿工作。对于不同地质成因形成的矿床,其矿体赋存部位、矿体形态、矿物组合等通常也会有较大差别,导致找矿方向和找矿方法也有所不同。因此,进一步确定矿床成因,对于矿区后续找矿工作的有效开展具有较为关键的指导作用。本研究对白牛厂矿床的硫同位素重新进行分析,并结合已有的研究成果,对白牛厂银多金属矿床硫来源进行讨论,对矿床成因进行进一步论证,并对滇东南地区的找矿远景进行探讨。

1 区域地质概况

滇东南地区位于扬子地块、南岭褶皱系和三江褶皱系的交汇部位,北西以弥勒—师宗断裂与扬子地块为界,南西以红河断裂与哀牢山断块相连,南接越北古陆,东部与文麻断裂、南岭褶皱系相接(图1)。白牛厂多金属矿床位于该区域中部,由于受相邻构造单元影响,是地质构造较为复杂的地区^[1]。

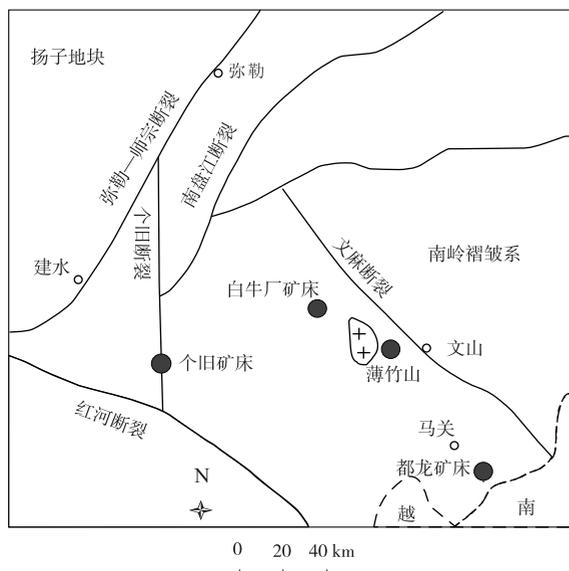


图1 滇东南地区地质特征^[6]

Fig. 1 Geological characteristics of Southern Yunnan Province

滇东南地区岩浆活动较为强烈,以燕山中—晚期最为发育且与成矿作用最为密切,主要分布有个旧杂

岩体、都龙老君山岩体和薄竹山岩体,成分上主要为酸性侵入岩,多呈岩基或岩株产出,其次为基性—超基性岩。该区地层出露主要有元古界、寒武系、中下奥陶统、泥盆系及石炭系等,其中寒武系主要为一套浅海陆棚—滨海潮坪及泻湖相细碎屑岩-碳酸盐建造,下寒武统以碎屑岩为主,中—上寒武统主要为碳酸盐组合,是区内较为重要的赋矿层位。泥盆系广泛发育,为一套滨海—浅海相碳酸盐岩及碎屑岩组合^[1]。

2 矿床地质特征

矿区出露的地层主要为寒武系中、下统及泥盆系下统,主体构造为圆宝山复式向斜及NWW向断裂,其中,NWW向断裂为矿区主要的控矿构造(图2)。圆宝山复式向斜位于矿区北西部,轴面呈NWW向展布,轴长约2 km,其核部主要由龙哈组白云岩组成,枢纽两端延伸至矿区外围,地层产状由四周向中心槽部倾斜,总体显示为一个宽缓的构造盆地,从而控制了沉积相的空间配置方式^[6]。

白牛厂矿床矿化范围较大,共分为白羊、咪尾、穿心洞、对门山和阿尾5个矿段(图2),矿体主要赋存于中寒武系田蓬组上部及龙哈组下部,矿体按产状可分为2种,一种为与沉积岩层产状基本一致的层状、似层状、透镜状整合矿体,另一种为与地层不整合的脉状、网脉状和浸染状矿体。其中以 V_1 矿体规模最大,金属量占矿床总金属储量的95%以上,该矿体几乎贯穿了所有矿段。 V_1 矿体长度约1 200 m,沿倾向延深超过1 400 m,总体倾斜南,倾角一般为20°左右,由于受圆宝山复式向斜控制,与地层同步弯曲。该矿床中的矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿等,主要的银矿物有银黝铜矿、黝锑银矿、深红银矿、辉锑银矿等,主要成矿元素为锌、铅、银和锡,伴生成矿元素为铜、硫、锑、砷、镓、铟、镉等,脉石矿物主要为微晶石英、方解石、白云母、绢云母等^[6]。

白牛厂多金属矿床围岩蚀变总体偏弱,而东南部阿尾矿段围绕隐伏花岗岩体围岩蚀变表现较强,由内向外总体可分为云英岩化、角岩化、矽卡岩化、碳酸盐化4个蚀变带(图3)。

薄竹山复式花岗岩体位于文山市城以西约30 km(图1),地表呈纺锤体状沿NW向展布,轴向为300°~320°,长约20 km,宽度为2~10 km,出露面积约为120 km²,主体为黑云母二长花岗岩,向北西侵入于寒武系和奥陶系并隐伏于白牛厂矿床之下^[7-8]。

3 硫同位素测试分析

本研究硫同位素分析在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。具体流程

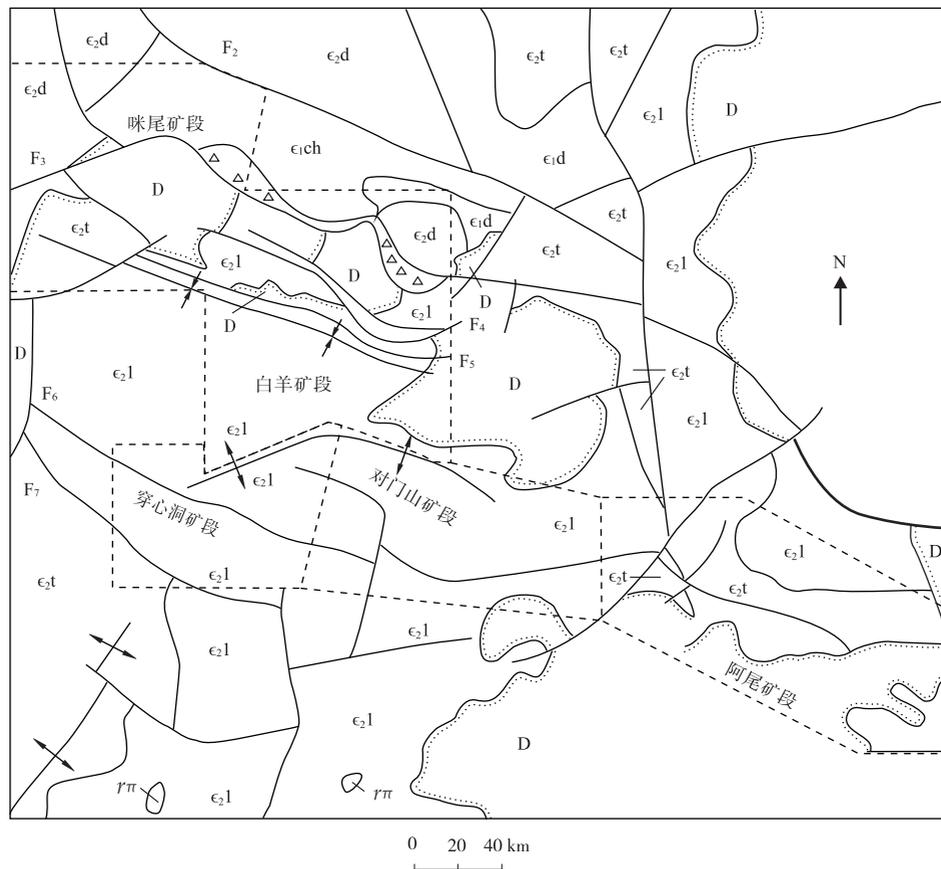


图 2 白牛厂矿区地质特征

Fig. 2 Geological characteristics of Bai Niuchang mining area

D—泥盆系; ε₂l—龙哈组; ε₂t—田蓬组; ε₂d—大丫口组; ε₁d—大寨组; ε₁ch—冲庄组; rπ—花岗岩; —构造角砾岩; —整合界线; —不整合界线; —背斜; —向斜; F—断层

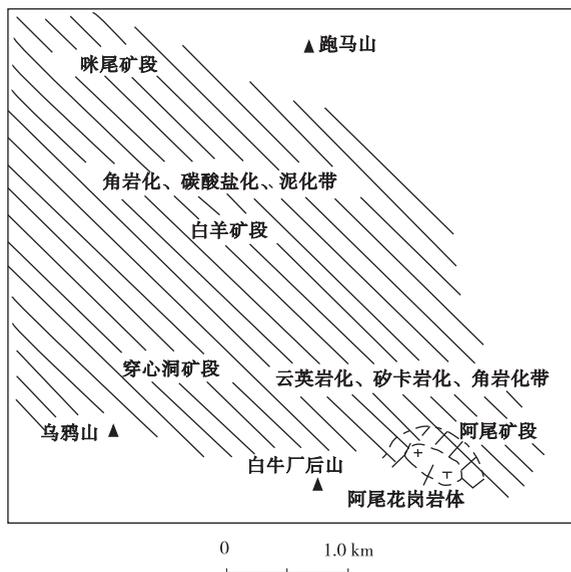


图 3 白牛厂矿区围岩蚀变分带平面特征

Fig. 3 Planar zoning characteristics of surrounding rock alteration of Bai Niuchang mining area

为:首先在双目镜下手工挑选出磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和黄铜矿,纯度均达99%以上,在玛瑙钵中研磨至200目以下,对不同矿物加入不同质量比例的CuO((黄铁矿):(CuO)=1:6,(磁黄铁矿):

(CuO)=1:8,(闪锌矿):(CuO)=1:6,(方铅矿):(CuO)=1:4)并充分混合后装入容器中,置于马弗炉内,加热至1000℃,在真空条件下保持15min,将矿物中的S氧化为SO₂。分析测试采用连续硫同位素质谱仪CF-IRMS 配备 Elemental Analyzer 进样器完成,标准物质选用 GBW 04414 (Ag₂S, δ³⁴S_{CDT}=(−0.07 ± 0.13)‰)、GBW 04415 (Ag₂S, δ³⁴S_{CDT}=(22.15 ± 0.14)‰),数据采用相对国际硫同位素标准 CDT (Canyon Diablo Troilite) 值表示,测试误差小于 ± 0.2‰ (2σ)^[9]。本研究共分析了44件白牛厂矿床新开采矿段的硫化物样品,样品包括黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和黄铜矿,相关测试结果见表1。

4 讨论

根据矿床中硫同位素组成,可以分析矿床中硫的来源,进而可以探讨矿床成因。一般来说,硫主要有3个来源,即幔源硫(δ³⁴S值约为0)、地壳硫及混合硫,而成矿流体中的总硫同位素组成主要受制于硫源的同位素组成、成矿物理化学条件和水—岩相互作用程度等条件^[8]。白牛厂矿床中的矿石矿物以硫化物为主,主要为黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅

矿、黄铜矿等。本研究结合白牛厂矿床新开采矿段硫化物的硫同位素组成(表1),对该矿床硫同位素组成特征及硫来源进行分析,并进一步讨论矿床成因。

4.1 硫同位素组成

白牛厂矿床原生矿物组成相对简单,主要为硫化物。本研究测试结果(表1)表明:白牛厂矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较小,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2.5‰~4.0‰,磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2.7‰~3.9‰,闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2.9‰~4.3‰,方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为1.5‰~2.3‰,黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为3.4‰~4.3‰。

由图4可知:白牛厂矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布比较集中,所有硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为1.5‰~5.3‰,均值为3.2‰, $\delta^{34}\text{S}$ 值集中分布于2‰~5‰,峰值为2‰~4‰,相近的 $\delta^{34}\text{S}$ 值说明硫化物样品可能具有相同的来源。不同矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值差别不大,但从 $\delta^{34}\text{S}$ 值均值来看, $\delta^{34}\text{S}_{\text{磁黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{毒砂}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,不符合成矿流体处于平衡状态下 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{磁黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 的特征,说明成矿流体总体未能达到平衡状态,可能由于多期作用叠加所致。

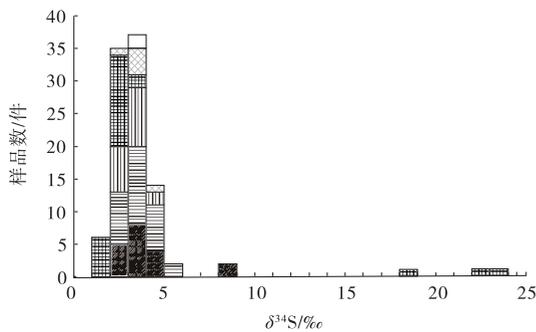


图4 白牛厂矿床硫同位素组成直方图

Fig. 4 Sulfur isotopic composition histogram of Bainiuchang Deposit

□—毒砂; ▨—黄铜矿; ▩—方铅矿;
▧—闪锌矿; ▦—磁黄铁矿; ▥—黄铁矿

4.2 硫来源探讨

在热液矿床中,由于成矿作用中固—液相之间的同位素分馏作用,热液形成的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般不等于热液总 $\delta^{34}\text{S}$ 值($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$),而是热液体系中总硫同位素组成 f_{O_2} 、 f_{S_2} 、pH、离子强度和温度的函数,即 $\delta^{34}\text{S} = f(\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}, f_{\text{O}_2}, f_{\text{S}_2}, \text{pH}, I, T)$ 。因此,热液矿床中矿物的硫同位素组成不仅取决于源区物质的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,而且与含硫成矿物质在热液体系中迁移和沉淀时的物理化学条件有关。热液体系中总硫的同位素组成 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = (\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} \times X_{\text{H}_2\text{S}}) + (\delta^{34}\text{S}_{\text{HS}^-} \times X_{\text{HS}^-}) + (\delta^{34}\text{S}_{\text{S}_2^{2-}} \times X_{\text{S}_2^{2-}}) + (\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}} \times X_{\text{SO}_4^{2-}}) + (\delta^{34}\text{S}_{\text{HSO}_4^-} \times X_{\text{HSO}_4^-}) + (\delta^{34}\text{S}_{\text{KSO}_4^-} \times X_{\text{KSO}_4^-}) + (\delta^{34}\text{S}_{\text{NaSO}_4^-} \times X_{\text{NaSO}_4^-})$,其中 X 为硫化物或硫酸盐相对于总硫的摩尔分数。在白牛厂矿区尚未发现硫酸盐类矿物,主要的矿石矿物均为硫化物。因此,根据上

式,白牛厂矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似代表成矿流体的总硫同位素组成^[8]。

白牛厂矿床主要赋存于中寒武统田蓬组与龙哈组界面附近的断层破碎部位的细碎屑岩中,张乾^[11]通过对比研究国内外泥岩-细碎屑岩型铅锌矿床发现,该类型矿床大部分 $\delta^{34}\text{S}$ 值为正值,变化范围为10‰~30‰,矿床中的硫主要来自海水硫酸盐的分解。白牛厂矿床中所有硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为1.5‰~5.3‰,难以采用“海水硫酸盐还原理论”进行解释。白牛厂矿床硫化物具有与S型花岗岩相关热液矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值相似的特征^[8],这种相对均一的硫同位素值表明硫源来自均一的热液体系,而非由同位素组成的不同来源硫均一化形成。

徐文忻^[12]根据600多件硫化物的硫同位素数据的分析,将我国锡矿床的硫源分为岩浆硫和岩浆与地层混合硫2种。岩浆来源硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值较小,一般为-2‰~6‰,而混合来源硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值较大,一般大于12‰。Xie等^[9]在研究白牛厂矿床硫同位素组成特征时,将其分为白羊矿段和东南部其他矿段2组进行讨论,得出早期的硫来自下地壳基底岩石的淋滤,晚期的硫来自燕山期的花岗岩浆。实际上白牛厂矿床多数矿体同时跨越数个矿段,并且2组硫同位素组成并无本质区别(白羊矿段 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2‰~5‰,东南部矿段 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2‰~6‰)。结合区域地质特征,可知薄竹山花岗岩体隐伏侵入于矿床东南部,而在白羊矿段底部也发现了隐伏岩体。因此,本研究认为白牛厂矿床矿石矿物中的硫主要由燕山晚期花岗岩岩浆提供。

4.3 矿床成因

白牛厂矿床由于开采较晚,研究深度欠缺,有关矿床成因争议较大,白牛厂矿床与薄竹山岩体的关系是研究矿床成因的一个关键因素^[1]。王吉珺等^[13]通过对我国辽西地区中生代花岗岩的研究表明,硫型二长花岗岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为1.5‰~5.9‰,与白牛厂矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值极其相近,说明白牛厂矿床与花岗岩岩浆有密切联系,硫可能主要由花岗岩岩浆提供。李开文等^[14]获得的白牛厂矿床以往曾认为是最具有典型热水沉积作用特征的白羊矿段锡石的形成年龄为 $(87.4 \pm 3.7)\text{Ma} \sim (88.4 \pm 4.3)\text{Ma}$,与薄竹山花岗岩的成岩时代 $((84.22 \pm 0.74)\text{Ma} \sim (88.10 \pm 0.66)\text{Ma})$ 极其匹配,说明锡成矿主要受岩浆作用控制,而非主要来自海底热水喷流作用。白牛厂铅同位素研究表明,白牛厂矿床的铅主要来自岩浆作用^[1]。随着白牛厂矿床的进一步勘探和研究发现,矿床的矿化特征主要受晚白垩世酸性岩浆活动控制,尤以东南部阿尾矿段最具典型,以阿尾隐伏花岗岩体为中心向外和向

上的矿化具有水平和垂直分带现象(图 5),分别形成了高一中温钨锡矿化带、铅锌矿化带、铜矿化带和中—低温银锡铅锌矿化带、银铅锌矿化带和低温锑矿化带,并在相应的矿化部位形成了矿体^[15]。

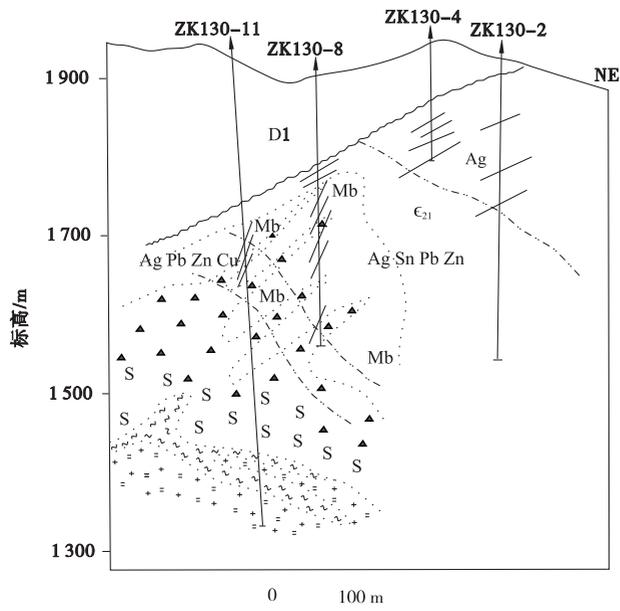


图 5 白牛厂矿床阿尾矿段 130# 勘探线剖面^[5]

Fig. 5 No.130 exploration line profile of Awei ore section of

Baniuchang Deposit

- [D1]—下泥盆统; [C₂₁]—中寒武统龙哈组; [黑云母花岗岩];
- [云英岩化]; [砂卡岩化及角岩化]; [Mb]—大理岩化;
- [不整合界线]; [接触变质界线]; [矿化界线];
- [ZK130-11]—钻孔及编号; [脉状矿体]

4.4 滇东南成矿带找矿远景

滇东南成矿带位于南岭成矿带西段,是我国重要的锡多金属矿产地,该成矿带产出的白牛厂、个旧、都龙 3 个超大型多金属矿床均伴生有晚白垩世花岗岩体,分别为薄竹山岩体、个旧岩体和老君山岩体。随着矿床的开发及研究工作的深入,越来越多的证据显示滇东南多金属矿床的成因与晚白垩世岩浆活动有密切的关系。个旧花岗岩锆石 U-Pb 年龄多集中于 (85.8 ± 0.6) Ma~(77.4 ± 2.5) Ma^[16],个旧矿床的成矿时代多集中于 (95.3 ± 0.7) Ma~(77.4 ± 0.6) Ma。老君山岩体的锆石 U-Pb 年龄集中于 (86.83 ± 0.45) Ma~(86.0 ± 0.5) Ma^[17],都龙矿床的锡石 U-Pb 年龄为 (89.4 ± 1.4) Ma^[18]。结合白牛厂矿床地球化学与年代学研究认为,在晚白垩世,滇东南地区发生了大规模的区域伸展作用,从而诱发了富含 Sn、Pb、Zn 等成矿物质的花岗质岩浆底辟上侵,并在有利地段富集成矿^[19-21]。因此,在滇东南地区围绕晚白垩世岩体周围及外缘为寻找同类型多金属矿产的有利地段。

5 结 语

分析了白牛厂银多金属矿床的硫同位素组成特征,认为该矿床矿石矿物的 δ³⁴S 值分布范围较小,该矿床的硫主要由岩浆作用提供,为岩浆热液型矿床;滇东南地区围绕晚白垩世花岗岩体及外围为寻找多金属矿产的有利地段。

参 考 文 献

- [1] 李开文,张 乾,王大鹏,等.滇东南白牛厂多金属矿床铅同位素组成及铅来源新认识[J].地球化学,2013,42(2):116-130. Li Kaiwen, Zhang Qian, Wang Dapeng, et al. New understanding on lead isotopic composition and lead source of the Baniuchang polymetallic deposit, southeast Yunnan, China [J]. *Geochimica*, 2013, 42(2):116-130.
- [2] 张洪培,刘继顺,李晓波,等.滇东南花岗岩与锡、银、铜、铅、锌多金属矿床的成因关系[J].地质找矿论丛,2006,21(2):87-90. Zhang Hongpei, Liu Jishun, Li Xiaobo, et al. Relationship of granites to tin, silver, copper, lead, zinc, polymetallic deposits in Southeastern Yunnan, China [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2006, 21(2):87-90.
- [3] 白金刚,池三川,梅建明.云南白牛厂超大型银多金属矿床黄铁矿的晶型特征及其成因意义[J].贵金属地质,1995(4):302-306. Bai jinggong, Chi Sanchuan, Mei Jianming. The typomorphic characteristic of pyrites and its genetic meaning in Baniuchang siler-polymetallic deposit, Yunnan Province [J]. *Journal of Precious metallic Geology*, 1995(4):302-306.
- [4] 高子英.蒙自白牛厂银多金属矿床的成因研究[J].云南地质,1996,15(1):91-102. Gao Ziyong. Study on the genesis of the Baniuchang Ag polymetallic deposit in Mengzi [J]. *Yunnan Geology*, 1996, 15(1):91-102.
- [5] Zhu C H, Zhang Q, Shao S X, et al. Lead isotopic composition and lead source in the Baniuchang Ag-polymetallic deposit, Yunnan Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4):845-857.
- [6] 云南省地质矿产勘查开发局第二地质大队.云南省蒙自县白牛厂地区大比例尺成矿预测报告[R].文山:云南省地质矿产勘查开发局第二地质大队,1993. The Second Geological Brigade of Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration in Yunnan Province. Large-scale Mineralization Forecast Report on the Baniuchang Deposit in Mengzi County, Yunnan Province [R]. The Second Geological Brigade of Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration in Yunnan Province, 1993.
- [7] 张世涛,陈国昌.滇东南薄竹山复式岩体的地质特征及其演化规律[J].云南地质,1997,16(3):222-232. Zhang Shitao, Chen Guochang. The geological features and evolution of the Baozhu MT complex granite body in SE Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 1997, 16(3):222-232.
- [8] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16(1):491-559.
- [9] Xie H J, Zhu C H, Zhang Q, et al. Sulfur isotopic composition of the Baniuchang super-large Ag polymetallic deposit, Yunnan Province,

- China: implications for the source of sulfur in ore-forming fluids [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2009, 28(3): 284-292.
- [10] 张洪培. 云南蒙自白牛厂银多金属矿床——与花岗质岩浆作用有关的超大型矿床 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
Zhang Hongpei. Bainiuchang Super-large Silver-polymetallic Ore Deposit Related to Granitic Magmatism in Mengzi, Yunnan, China [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [11] 张 乾. 泥岩—细碎屑岩型铅锌矿床的主要地质地球化学特征及时控因素 [J]. *地球化学*, 1990(3): 230-238.
Zhang Qian. Principal geological and geochemical features of Pb-Zn deposits associated with pelite and fine detrital rocks and their time-bound factors [J]. *Geochimica*, 1990(3): 230-238.
- [12] 徐文忻. 我国锡矿床的同位素地球化学的研究 [J]. *矿产与地质*, 1995, 9(1): 1-11.
Xu Wenxin. Isotope geochemistry of tin deposits in China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1995, 9(1): 1-11.
- [13] 王吉珺, 余和勇. 青龙—阜新花岗岩成矿模式 [J]. *矿床地质*, 1992, 11(4): 331-340.
Wang Jijun, Yu Heyong. Metallogenic model of Qinglong-Fuxin granites [J]. *Mineral Deposits*, 1992, 11(4): 331-340.
- [14] 李开文, 张 乾, 王大鹏, 等. 云南蒙自白牛厂多金属矿床锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年代学 [J]. *矿物学报*, 2013, 33(2): 523-529.
Li Kaiwen, Zhang Qian, Wang Dapeng, et al. LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of cassiterite from the Bainiuchang polymetallic deposit, Yunnan province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33(2): 523-529.
- [15] 李开文, 郭君功, 方怀宾, 等. 滇东南白牛厂多金属矿床稀土元素特征及找矿远景 [J]. *现代矿业*, 2018(5): 131-136.
Li Kaiwen, Guo Jungong, Fang Huaibin, et al. Rare earth elements geochemical characteristics and prospecting perspective of Bainiuchang polymetallic deposit in Southeastern Yunnan Province [J]. *Modern Mining*, 2018(5): 131-136.
- [16] Cheng Y B, Mao J W, Spandler C. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block, South China [J]. *Lithos*, 2013: 213-229.
- [17] Feng J R, Mao J W, Pei R F. Ages and geochemistry of Laojunshan granite in southern Yunnan, China: implications for W-Sn polymetallic ore deposits [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2013, 107: 573-589.
- [18] Zhao Z Y, Hou L, Ding J, et al. A genetic link between Late Cretaceous granitic magmatism and mineralization in the southern South China Block: a case study of the Dulong Sn dominant polymetallic deposit [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 93: 268-289.
- [19] 黎 强, 黄明清, 罗 毅, 等. 白牛厂矿区成矿模式与深部成矿预测 [J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2014, 30(1): 1-5.
Li Qiang, Huang Mingqing, Luo Yi, et al. The metallogenic model and deep metallogenic prediction of Bainiuchang mine [J]. *Journal of Kunming Metallurgy College*, 2014, 30(1): 1-5.
- [20] 杨宝富, 李 彬, 魏 超. 个旧老厂矿田东部矿床控矿因素、成矿规律及找矿预测 [J]. *矿物学报*, 2016, 36(4): 479-487.
Yang Baofu, Li Bin, Wei Chao. Ore-controlling factors, metallogenic regularity and prospecting of eastern Laochang deposits, Gejiu Mine, Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2016, 36(4): 479-487.
- [21] 张所清, 罗爱国, 苏 剑, 等. 都龙矿区铜街—曼家寨矿段找矿模式与盲矿体预测 [J]. *矿物学报*, 2016, 36(4): 550-554.
Zhang Suoqing, Luo Aiguo, Su Jian, et al. Ore prospecting model and blind orebody prediction for Tongjie-Manjiazhai ore domain in Dulong Mine, SE Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2016, 36(4): 550-554.

(责任编辑 王小兵)

表 1 滇东南白牛厂矿床硫同位素组成
Table 1 Sulfur isotopic composition of Bainiuchang Deposit

序号	样品编号	采样位置	采样地质特征	样品岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$	数据文来源
1	09BC1600-4	穿心洞矿段1 600 m中段	块状铅锌矿石	黄铁矿	2.9	本研究
2	08BC1640-2	穿心洞矿段1 640 m中段	块状铅锌矿石	黄铁矿	3.0	本研究
3	08BC1640-3	穿心洞矿段1 640 m中段	含黄铁矿白云岩	黄铁矿	3.0	本研究
4	08BC1640-4	穿心洞矿段1 640 m中段	矿状铅锌矿石	黄铁矿	3.0	本研究
5	09BD1480-3	对门山矿段1 480 m中段	矿状磁黄铁矿铅锌矿石	黄铁矿	4.0	本研究
6	09BD1660-1	对门山矿段1 660 m中段	矿状铅锌矿石	黄铁矿	3.6	本研究
7	09BA1800-2	阿尾矿段1 800 m中段	浸染状黄铁矿铅锌矿石	黄铁矿	2.8	本研究
8	09BA1800-5	阿尾矿段1 800 m中段	矿状磁黄铁矿铅锌矿石	黄铁矿	2.5	本研究
9	BPD200-20	PD-205沿脉	块状黄铁矿闪锌矿矿石	黄铁矿	4.1	文献 [9]
10	B6-9	6#坑3#斜井上山平口	脉状黄铁矿方铅矿矿石	黄铁矿	3.8	文献 [9]
11	B6-14	6#坑6#斜井上山平口	块状黄铁矿矿石	黄铁矿	4.0	文献 [9]
12	B6-20	6#坑2#斜井上山	脉状磁黄铁矿黄铁矿矿石	黄铁矿	4.2	文献 [9]
13	B6-77	1 718~1 750 m中段矿石堆	块状黄铁矿闪锌矿矿石	黄铁矿	4.9	文献 [9]
14	B2-43	1 743 m中段矿石堆	块状黄铁矿方铅矿矿石	黄铁矿	3.6	文献 [9]
15	B2-46	1 744 m中段矿石堆	块状黄铁矿方铅矿矿石	黄铁矿	3.8	文献 [9]
16	D60-3	对门山1 760 m中段	块状铅锌矿石	黄铁矿	3.2	文献 [10]
17	C1-1	穿心洞矿段1#坑	脉状铅锌矿石	黄铁矿	3.4	文献 [10]
18	C22	ZK9-8钻孔, 274 m标高	鲕状白云质灰岩	黄铁矿	8.1	文献 [6]
19	B125	ZK57-9钻孔, 281 m标高	碎裂岩化白云岩	黄铁矿	8.6	文献 [6]
20	09BCD-4	穿心洞矿段矿石堆	块状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	3.9	本研究
21	09BD1480-3	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	磁黄铁矿	3.0	本研究
22	09BD1480-16	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	2.8	本研究
23	09BD1480-24	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	磁黄铁矿	2.9	本研究
24	09BD1480-26	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	2.7	本研究
25	09BD1480-27	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	2.9	本研究
26	09BDD-3-3	对门山矿段矿石堆	块状磁黄铁矿铅锌矿石	磁黄铁矿	2.8	本研究
27	09BDD-7	对门山矿段矿石堆	脉状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	2.8	本研究
28	09BA1800-4	阿尾矿段1 800 m中段	脉状磁黄铁矿灰岩	磁黄铁矿	3.5	本研究
29	09BAD-1-3	阿尾矿段矿石堆	块状磁黄铁矿铅锌矿石	磁黄铁矿	3.6	本研究
30	09BAD-8-3	阿尾矿段矿石堆	块状磁黄铁矿铅锌矿石	磁黄铁矿	3.6	本研究
31	BPD200-7	PD-201沿脉	块状磁黄铁矿方铅矿矿石	磁黄铁矿	3.9	文献 [9]
32	BPD200-8	PD-202沿脉	块状磁黄铁矿闪锌矿矿石	磁黄铁矿	4.3	文献 [9]
33	BPD200-20	PD-206沿脉	块状磁黄铁矿闪锌矿矿石	磁黄铁矿	4.5	文献 [9]
34	B6-12	6#坑5#斜井上山平口	块状磁黄铁矿方铅矿矿石	磁黄铁矿	3.5	文献 [9]
35	B6-18	6#坑2#斜井上山	块状磁黄铁矿闪锌矿矿石	磁黄铁矿	4.0	文献 [9]
36	B6-19	6#坑2#斜井上山	块状磁黄铁矿方铅矿矿石	磁黄铁矿	3.6	文献 [9]
37	B6-20	6#坑2#斜井上山	脉状磁黄铁矿黄铁矿矿石	磁黄铁矿	5.2	文献 [9]
38	B6-25	6#坑1#斜井9#穿脉	纹层状磁黄铁矿方铅矿矿石	磁黄铁矿	3.9	文献 [9]
39	B6-34	6#坑1#斜井平巷	块状磁黄铁矿闪锌矿矿石	磁黄铁矿	4.5	文献 [9]
40	B6-36	6#坑1#斜井9#穿脉	块状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	3.3	文献 [9]
41	B6-50	1 710~1 750 m中段矿石堆	块状闪锌矿矿石	磁黄铁矿	4.3	文献 [9]
42	B6-53	1 711~1 750 m中段矿石堆	块状磁黄铁矿方铅矿矿石	磁黄铁矿	3.9	文献 [9]
43	B6-57	1 713~1 750 m中段矿石堆	块状磁黄铁矿方铅矿矿石	磁黄铁矿	5.3	文献 [9]
44	B2-36	1 742 m中段矿石堆	块状磁黄铁矿闪锌矿矿石	磁黄铁矿	3.6	文献 [9]
45	B2-64	1 747 m中段矿石堆	块状闪锌矿磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	4.6	文献 [9]
46	B1-364	ZKD-1-364回次浸染状矿石	浸染状铜矿石	磁黄铁矿	2.3	文献 [10]
47	B3-3	白羊矿段1 710 m中段	块状铅锌银矿石	磁黄铁矿	4.0	文献 [10]
48	D3-1	对门山矿段1 780 m中段	稠密浸染状铜铅锌矿石	磁黄铁矿	3.2	文献 [10]
49	09BCD-3	穿心洞矿段矿石堆	块状铅锌矿石	闪锌矿	4.1	本研究

续表

序号	样品编号	采样位置	采样地地质特征	样品岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{SM}}$ /‰	数据来源
50	09BD1480-3	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	闪锌矿	3.6	本研究
51	09BD1480-7	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	闪锌矿	3.2	本研究
52	09BD1480-8	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	闪锌矿	3.0	本研究
53	09BD1480-9	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	闪锌矿	3.3	本研究
54	09BD1480-13	对门山矿段1 480 m中段	块状铅锌矿石	闪锌矿	3.2	本研究
55	09BD1480-24	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	闪锌矿	2.9	本研究
56	09BD1480-25	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	闪锌矿	3.0	本研究
57	09BD1660-1	对门山矿段1 660 m中段	块状铅锌矿石	闪锌矿	3.2	本研究
58	09BDD-5	对门山矿段矿石堆	块状磁黄铁矿铅锌矿石	闪锌矿	3.2	本研究
59	09BDD-8	对门山矿段矿石堆	脉状闪锌矿黄铜矿石	闪锌矿	3.6	本研究
60	09BA1760-10	阿尾矿段1 760 m中段	浸染状铅锌矿石	闪锌矿	3.5	本研究
61	09BA1760-11	阿尾矿段1 760 m中段	浸染状铅锌矿石	闪锌矿	4.3	本研究
62	BPD200-12	PD-203沿脉	脉状闪锌矿矿石	闪锌矿	2.7	文献 [9]
63	B6-34	6#坑1#斜井平巷	块状磁黄铁矿闪锌矿矿石	闪锌矿	2.7	文献 [9]
64	B2-52	1 745 m中段矿石堆	块状方铅矿闪锌矿矿石	闪锌矿	2.8	文献 [9]
65	D25-7	对门山矿段1 725 m中段	块状铅锌矿石	闪锌矿	2.4	文献 [10]
66	B40-25	白羊矿段1 640 m中段	块状铅锌矿石	闪锌矿	2.4	文献 [10]
67	098D1480-3-4	对门山矿段1 480 m中段	块状磁黄铁矿铅锌矿石	方铅矿	1.8	本研究
68	09BDD-9	对门山矿段矿石堆	块状磁黄铁矿铅锌矿石	方铅矿	1.9	本研究
69	09BA1760-11	阿尾矿段1 760 m中段	浸染状铅锌矿石	方铅矿	2.3	本研究
70	09BA1760-15	阿尾矿段1 760 m中段	稠密浸染状铅锌矿石	方铅矿	2.3	本研究
71	09BAD-1-4	阿尾矿段矿石堆	块状磁黄铁矿铅锌矿石	方铅矿	2.1	本研究
72	09BAD-2-4	阿尾矿段矿石堆	浸染状磁黄铁矿铅锌矿石	方铅矿	1.5	本研究
73	09BAD-8-4	阿尾矿段矿石堆	块状磁黄铁矿铅锌矿石	方铅矿	2.1	本研究
74	BPD200-3	PD-200沿脉	脉状方铅矿矿石	方铅矿	2.1	文献 [9]
75	BPD200-15	PD-204沿脉	块状方铅矿矿石	方铅矿	1.6	文献 [9]
76	B6-9	6#坑2#斜井上山平口	脉状黄铁矿方铅矿矿石	方铅矿	2.2	文献 [9]
77	B6-12	6#坑4#斜井上山平口	块状磁黄铁矿方铅矿矿石	方铅矿	2.3	文献 [9]
78	B6-32	6#坑1#斜井平巷	块状方铅矿闪锌矿矿石	方铅矿	1.9	文献 [9]
79	B6-53	1 712~1 750 m中段矿石堆	块状方铅矿矿石	方铅矿	2.6	文献 [9]
80	B6-57	1 714~1 750 m中段矿石堆	块状磁黄铁矿方铅矿矿石	方铅矿	2.3	文献 [9]
81	B6-58	1 715~1 750 m中段矿石堆	块状方铅矿闪锌矿矿石	方铅矿	2.0	文献 [9]
82	B6-60	1 716~1 750 m中段矿石堆	块状方铅矿矿石	方铅矿	1.8	文献 [9]
83	B6-63	1 717~1 750 m中段矿石堆	块状方铅矿闪锌矿矿石	方铅矿	2.3	文献 [9]
84	B2-42	1 742 m中段矿石堆	块状方铅矿矿石	方铅矿	3.2	文献 [9]
85	B2-58	1 746 m中段矿石堆	脉状方铅矿矿石	方铅矿	2.3	文献 [9]
86	D60-3	对门山矿段1 760 m中段	块状铅锌矿石	方铅矿	2.3	文献 [10]
87	B1-1	白羊矿段1 710 m中段	块状铅锌银矿石	方铅矿	3.4	文献 [6]
88	D1-1	对门山矿段1 780 m中段	稠密浸染状铜铅锌矿石	方铅矿	2.5	文献 [6]
89	H28	牛作底	含方铅矿灰质白云岩	方铅矿	23.4	文献 [6]
90	H29	牛作底	含方铅矿灰质白云岩	方铅矿	22.3	文献 [6]
91	H30	牛作底	含方铅矿灰质白云岩	方铅矿	18.6	文献 [6]
92	09BD1480-3	对门山矿段1 480 m中段	矿状磁黄铁矿铅锌矿石	黄铜矿	3.6	本研究
93	09BDD-6-2	对门山矿段矿石堆	块状黄铜矿磁黄铁矿矿石	黄铜矿	3.5	本研究
94	09BDD-8-2	对门山矿段矿石堆	脉状闪锌矿黄铜矿石	黄铜矿	3.9	本研究
95	09BA1760-11	阿尾矿段1 760 m中段	浸染状铅锌矿石	黄铜矿	4.3	本研究
96	09BAD-2-2	阿尾矿段矿石堆	浸染状磁黄铁矿铅锌矿石	黄铜矿	3.4	本研究
97	D1-364	ZKD-1-364回次浸染状矿石	浸染状铜矿石	黄铜矿	2.7	文献 [10]
98	D1-370	ZKD-1-370回次	浸染状铜矿石	毒砂	3.1	文献 [10]
99	L4	ZK58-6钻孔, 189 m标高	角砾状闪锌矿石	毒砂	3.7	文献 [6]