

滇西北衙金多金属矿床成矿地球化学特征

肖晓牛^{1,2}, 喻学惠¹, 莫宣学¹, 李勇¹, 黄行凯¹

(1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室及岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏南京 210007)

[摘要]北衙金多金属矿床是金沙江-哀牢山-红河断裂带与新生代富碱斑岩有关的斑岩型矿床之一。本文重点提供了流体包裹体中稀土微量元素和矿石 S、Pb 同位素分析结果,并对成矿流体及成矿物质来源等问题进行了讨论。研究表明,本区流体包裹体稀土总量较低, ΣREE 介于 $5.19 \times 10^{-6} \sim 9.0 \times 10^{-6}$ 之间,反映轻重稀土分馏程度的 $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ 比值和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 $4.12 \sim 11.25$ 和 $9.56 \sim 17.65$,表现为轻稀土明显富集型,流体包裹体与该区富碱斑岩的稀土配分模式基本一致。矿石的 S 和 Pb 同位素分析结果显示,本区不同矿段不同硫化物矿石黄铁矿、方铅矿和黄铜矿的 S 和 Pb 同位素组成没有明显差异,其 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别变化在 $38.256 \sim 39.0394$, $15.457 \sim 15.703$ 和 $18.380 \sim 18.673$ 范围内,且与富碱斑岩的 S、Pb 同位素组成十分相近。结合已有流体包裹体气液相成分研究成果,提出北衙金铜多金属矿床的成矿流体主要来自富碱斑岩岩浆的深部分异作用,在流体上升过程中可能受到地壳物质的混染。成矿物质具有与成矿流体相同的深部来源。因此,富碱斑岩岩浆作用不仅为含矿流体上升提供了动力和热能,同时也是成矿物质和成矿流体的主要来源和载体。

[关键词]金多金属矿 稀土微量元素 硫、铅同位素 滇西北衙

[中图分类号] P618

[文献标识码] A

[文章编号] 0495-5331(2011)02-0170-10

Xiao Xiao-niu, Yu Xue-hui, Mo Xuan-xue, Li Yong, Huang Xing-kai. Geochemical characteristics of metallogenesis in the gold-polymetallic deposit in Beiya, western Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(2):170-179.

0 引言

北衙金多金属矿床位于云南省西部大理白族自治州鹤庆县的南部,是金沙江-哀牢山-红河富碱斑岩成矿带中段的丽江-大理斑岩型金多金属矿化集中区的重要组成部分。据史料记载,北衙金矿原称北衙铅矿,从明代万历至清嘉庆年间就有民众在此采铅炼银。新中国成立后,先后有地质和冶金部门在此开展地质勘探与开发工作,因经费、技术及认识等诸多问题,该区地质找矿与矿产开发工作历经几上几下,直到 80 年代以来,北衙地区铜金等矿产的找矿工作才有了巨大突破。人们对北衙地区铜金成矿作用与富碱斑岩的关系,乃至金沙江-哀牢山-红河新生代富碱斑岩带的成矿潜力等问题给予了极大

的关注,研究成果丰富,学术观点百花齐放(赵晓鸥,1989;蔡新平等,1991;蔡新平,1993;马德云等,2001;晏建国等,2003)。大量地质勘察和研究工作表明,北衙金铜多金属矿床是一个与新生代富碱斑岩有着密切成因关系的成矿系列组合,具有相当广阔的找矿前景。因此,在该区深入开展与成矿作用相关的研究工作,提取新的成矿信息是十分必要的。本文重点报导了北衙金多金属矿床流体包裹体液相中稀土和微量元素测试结果,以及矿石矿物的 S 和 Pb 同位素地球化学的研究成果,并从上述实际资料出发,对成矿物质和成矿流体来源及演化、成矿物理化学条件以及矿床成因进行了初步讨论,为建立成矿模式和进一步找矿提供地质依据。

[收稿日期]2010-09-02;[修订日期]2011-01-26;[责任编辑]郝情情。

[基金项目]国家重点基础研究发展规划项目《三江岩浆作用与壳幔交换成矿制约》编号:2009CB42100 及自然科学基金(编号:40972049, 40572046)。

[第一作者]肖晓牛(1980年-),男,2009年毕业于中国地质大学(北京)大学,获博士学位,现为江苏省有色金属华东地质勘查局高级工程师,主要从事地质矿产勘查与研究工作。E-mail:xiaoni1980@yahoo.com.cn。

1 矿床地质特征

在大地构造上,北衙金多金属矿集区位于三江褶皱系与扬子准地台的弧形结合部位,扬子陆块西缘丽江-盐源台缘西缘中生代拗陷的南西端西缘。北衙矿集区总体上受南无山复式背斜东翼的一个NNE向次级向斜构造控制。已知的东矿带(五里盘矿床、桅杆坡矿床、笔架山矿床)和西矿带(金沟坝矿床、红泥塘矿床、万硐山矿床)就分布在该盆地的东西两侧(即向斜两翼,图1)。矿区出露有二叠系玄武岩,三叠系中统北衙组灰岩,古近系丽江组碎屑角砾岩,新近纪全新统冲积层等。其中北衙组灰岩广泛出露于向斜两翼,是本区主要的赋矿围岩。

区内存在NNE向和EW向两组隐伏断裂构造,其中EW向断裂为洱海-北衙-永仁区域隐伏断裂构造的一部分,控制着区内喜山期富碱斑岩的分布。矿体主要产于上述两组断裂的次级构造中,以及北衙向斜两翼或次级短轴背斜和向斜轴部解理裂隙发育的地带与蚀变破碎带的裂隙带中。区内广泛发育不同类型的围岩蚀变,主要有钾化、黄铁绢英岩化、硅化、夕卡岩化、碳酸盐化、褐铁矿化、赤铁矿化等。围岩蚀变与Au的矿化呈正相关关系,蚀变越强,Au含量越高。

据前人的研究表明,北衙金、铜多金属矿集区是由斑岩型、矽卡岩型、浅成热液型、交代蚀变岩型和隐爆角砾岩型等多种矿化类型组成的。其浅部的热液型矿床的矿石类型主要为硫化物型,硫化物矿物主要有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿,脉石矿物主要有长石、石英、方解石、白云石、重晶石等,矿石结构主要为自形-半自形结构,包含结构,充填结构等,块状、细脉状、浸染状构造。氧化物型矿石矿物有磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿等,矿石结构主要为交代结构,交代残留结构,假象结构等,土状,致密块状,蜂巢状,胶状等构造。金主要以自然金的形式分布于褐铁矿、磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿(假象)等矿物的颗粒间和裂隙中,仅少量以微粒金的形式嵌布或包裹于褐铁矿及磁铁矿集合体中。

2 流体包裹体的稀土和微量元素地球化学

为了深入探讨成矿流体的性质和来源,我们除了对矿体和含矿富碱斑岩中的石英进行了流体包裹体均一法测温及流体盐度、密度的测试(肖晓牛等,2009),还定量分析了流体包裹体中稀土微量元素

的丰度。样品为从万硐山矿段含矿石英正长斑岩中分离出来的石英单矿物。该石英正长斑岩为灰白色,似斑状结构,斑晶为正长石和石英,含量大约在56%~60%之间。石英斑晶表面干净新鲜,粒度在1~3mm左右,因熔蚀多呈似圆形或港湾状。含量占斑晶含量的20%~30%左右。正长石斑晶为自形-半自形柱粒状,粒度在1~5mm左右,发育环带和卡式双晶,但蚀变比较明显。偶见斜长石斑晶,以发育显著的聚片双晶为特征。基质具全晶质细粒-微粒结构,矿物成分同斑晶。可见黄铁矿化,黄铜矿化。该石英正长斑岩主要呈似岩墙状出露在万硐山矿段,在该矿段的岩心中也可见到。据肖晓牛等(2009)、徐兴旺等(2007)和徐寿民(2007)报导,该石英正长斑岩的时代为25~33Ma,是北衙地区主体成矿作用关系最密切的一期富碱斑岩。因此,从石英正长斑岩分离出的石英斑晶中的流体,可以代表主体成矿作用期的成矿流体。

样品制备流程为:将分离出来的纯净石英样品磨至40~60目,在中科院地质与地球物理研究所包裹体成分分析实验室用爆裂法(爆裂温度为500℃)提取石英中流体包裹体的液相成分,然后送到核工业部北京地质研究院用Finnigan MAT公司生产的双聚集高分辨ICP-MS ELEMENT仪进行流体包裹体稀土与微量元素成分分析,分析结果列于表1。

由表1可见,矿区内流体包裹体稀土总量 Σ REE较低,在 $5.19 \sim 9.0 \times 10^{-6}$ 之间,反映轻重稀土分馏程度的 Σ LREE/ Σ HREE比值和 $(La/Yb)_N$ 比值分别为4.12~11.25和9.56~17.65,显示了轻稀土明显富集的特征。经球粒陨石标准化后的稀土配分曲线为明显的右倾型(图2)。流体包裹体的 δEu 值为0.45~0.70,具极轻微的负铕异常,但Gd的正异常非常明显,对此被解释为与石英矿物多阶段结晶有关(李新俊等,2002)。

采用Wood(1979)的原始地幔数据标准化后的微量元素蛛网图见图3。由图3可见,流体与新生代富碱斑岩一样,也具有富集LILE(大离子亲石元素)而亏损HFSE(高场强元素)的特征,这与LILE离子半径大、电荷低,化学性质活泼,易溶于水的特征相符,也与很多成矿流体的特征一致。

利用REE示踪成矿流体性质和行为的一个重要途径,是分析和对比原岩和不同成矿蚀变阶段产物中REE的组成与分布。对此前人已做了很多探索性的研究工作(李新俊等,2002;王书来等,2004;

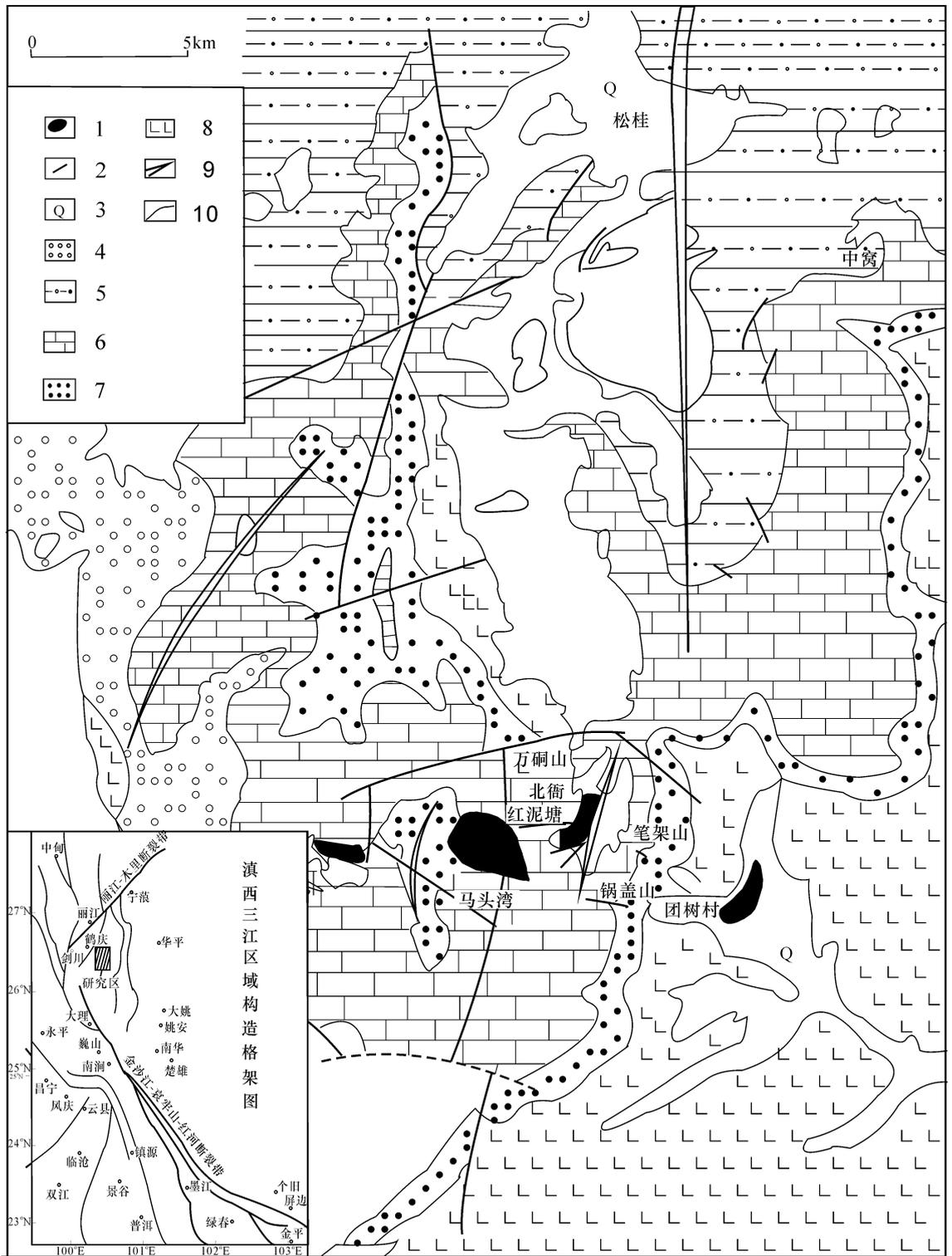


图1 北衙金多金属矿地质简图(据云南省地质三队北衙矿区地质勘查报告,略修改)

Fig. 1 Geological map of the Beiya gold-polymetallic deposit (after Geological Brigade No. 3 of Yunnan Province)

1-矿点及富碱斑岩;2-断层;3-第四系现代坡积、冲积层;4-第三系砾岩、砂岩、粘土;5-三叠系上统长石、石英砂岩;6-三叠系中统灰岩、白质灰岩;7-三叠系下统砂岩夹页岩;8-二叠纪玄武岩;9-褶皱;10-地层界线

1-mineral point and alkali-rich porphyries; 2-fault; 3-Quaternary slope, alluvium; 4-Tertiary conglomerate, sandstone, clay; 5-Upper Triassic feldspar quartz sandstone; 6-Middle Triassic limestone, dolomitic limestone; 7-Late Triassic limestone contains shale; 8-Permian basalt; 9-Fold; 10-stratigraphic boundary

表 1 北衙金多金属石英流体包裹体稀土微量元素特征 ($\times 10^{-6}$)

Table 1 REE and trace elements ($\times 10^{-6}$) of fluid inclusions in quartz from the Beiya gold, copper-polymetallic deposit

| 样品编号 | 岩石类型 | 寄主矿物 | Rb | Ba | Th | U | Ta | Nb |
|-------|------|------|-------|------|------|------|------|-------------|
| WDS-1 | QAP | 石英 | 19.39 | 138 | 1.05 | 0.51 | 0.01 | 0.06 |
| WDS-2 | QAP | 石英 | 2.88 | 439 | 0.37 | 0.27 | 0.48 | 0.14 |
| 样品编号 | 岩石类型 | 寄主矿物 | Pr | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy |
| WDS-1 | QAP | 石英 | 0.46 | 0.42 | 0.09 | 0.33 | 0.04 | 0.16 |
| WDS-2 | QAP | 石英 | 0.30 | 0.21 | 0.06 | 0.66 | 0.02 | 0.13 |
| 样品编号 | 岩石类型 | 寄主矿物 | La | Ce | Nd | Hf | Zr | Y |
| WDS-1 | QAP | 石英 | 1.60 | 3.63 | 2.08 | 0.05 | 1.12 | 0.79 |
| WDS-2 | QAP | 石英 | 1.29 | 1.33 | 0.99 | 0.03 | 0.09 | 0.49 |
| 样品编号 | 岩石类型 | 寄主矿物 | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | δ Eu |
| WDS-1 | QAP | 石英 | 0.03 | 0.08 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.70 |
| WDS-2 | QAP | 石英 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 0.45 |

分析单位:核工业部北京地质研究院。

连建国等,2005;李晓峰等,2005)。从图 2 可以看出,北衙金矿流体包裹体的稀土配分模式与该区富碱斑岩的稀土配分模式基本一致。因此,我们认为北衙金多金属矿成矿流体,很可能是富碱斑岩结晶分异作用的产物。这一认识与作者对矿区石英脉、方解石脉以及富碱斑岩中石英斑晶中流体包裹体盐度的测定结果相吻合,他进一步证明本区富含轻稀土和大离子亲石元素的高盐度流体并非是由热水溶液的不混溶作用或沸腾作用形成的,而是由中酸性岩浆在深部岩浆房中的分异作用形成和/或在岩浆结晶的最后阶段从浅部岩浆房中直接出溶形成的(徐受民等,2007)。

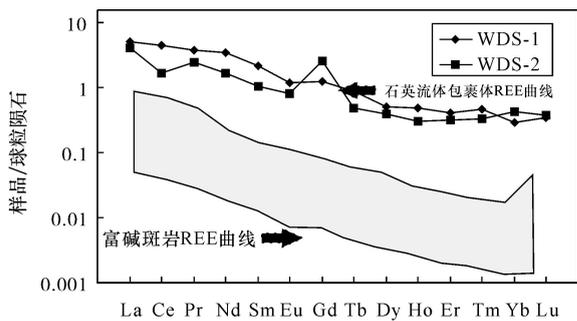


图 2 北衙金多金属矿床流体包裹体 REE 配分模式 (Boynton (1984) 的球粒陨石标准化)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE pattern of fluid inclusions from the Beiya gold-polymetallic deposit (base map from Boynton, 1984)

3 矿石的硫和铅同位素地球化学

用于进行硫和铅同位素测试的样品是从各矿段

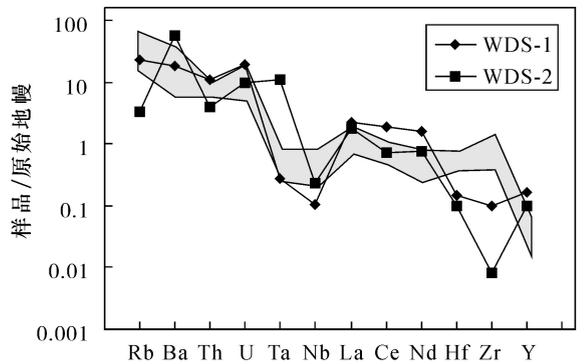


图 3 北衙金多金属矿床流体包裹体微量元素蛛网图 (Wood (1979) 的原始地幔数据进行标准化)

Fig. 3 Patterns of trace elements distribution patterns of fluid inclusions from the Beiya gold-polymetallic deposit using normalized original mantle data (base map from Wood, 1979)

分离出的矿石矿物黄铁矿、方铅矿、黄铜矿。S 同位素的测试工作在中国地质科学院资源所同位素室完成。Pb 同位素的测试工作在中国地质科学院地质所同位素室完成。

3.1 硫同位素组成及特征

用于硫同位素测试的样品为采自北衙矿区不同矿段不同类型(原生)矿床硫化物矿石中的黄铁矿、方铅矿和黄铜矿。测试结果显示,北衙矿区不同矿段矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值落在 $-2.4\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$ 范围内,均值为 1.18‰ ,极差 6.9‰ ,变化范围较小,均一化程度高,并具有塔式分布特征(图 4)。且不同矿段不同硫化物的硫同位素组成差异不明显,均接近幔

源硫(或陨石硫)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(‰),也符合斑岩型矿床硫同位素组成的特征(王莉娟等,2002)。因此,本区矿石中硫的来源非常一致,均具有明显的岩浆硫或幔源硫同位素组成特点。这样的硫同位素组成特征进一步佐证了成矿流体来源于岩浆。

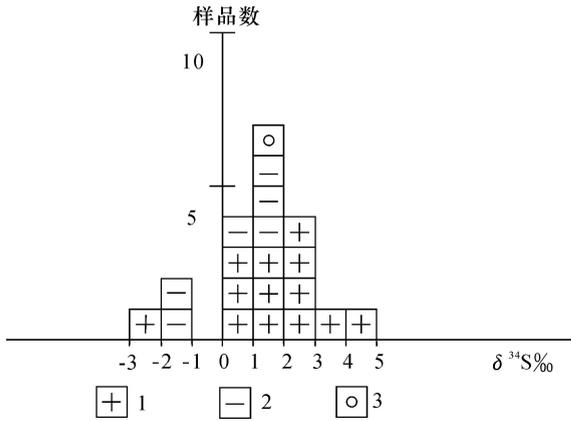


图4 北衙地区各矿床硫同位素组成频率分布图

Fig. 4 Histogram for frequency distribution of sulfur isotopic composition from various deposits in the Beiya area

1-黄铁矿;2-方铅矿;3-黄铜矿
1-pyrite; 2-galena; 3-chalcopyrite

前人(李景虹等,1991;吕伯西等,1993;刘秉光等,1999;高建国等,2000)对北衙地区与成矿有关的蚀变花岗岩、正长斑岩的硫同位素测定结果显示, $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 $0.1\text{‰} \sim 3.7\text{‰}$ 和 $1.1\text{‰} \sim 3.7\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很小,多数在 $1.0\text{‰} \sim 2.5\text{‰}$ 之间,与陨石的硫同位素组成相当。因此认为与北衙金铜多金属矿成矿作用密切相关的富碱斑岩的硫同位素组成以重硫型为主,富碱斑岩及与其相关的成矿物质主要

来自地幔。表2所列本区硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本上落到富碱斑岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围内,但略有偏高,反映两者具有相同的初始来源,即来自深部地幔。但由于成矿流体上升过程中可能遭受地壳的混染,因此,矿石的硫同位素比富碱斑岩要复杂一些。

3.2 铅同位素组成及特征

用于进行铅同位素测试的样品与硫同位素样品相同。北衙矿区各矿段Pb同位素测试结果列于表3。由表可见,本区各个矿段几种主要矿石矿物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别变化在 $38.256 \sim 39.0394$ 、 $15.457 \sim 15.703$ 和 $18.380 \sim 18.673$ 之间,均值分别为 38.796 、 15.616 和 18.587 。相同矿段不同硫化物矿物之间Pb同位素组成非常相近,不同矿段、不同金属硫化物之间的Pb同位素组成也无明显差别,这表明本区不同矿段不同类型矿床铅的来源和成因是相同的。

在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造模式图上(图5a),本区Pb同位素的投点较为分散,部分落到上地幔演化线与造山带演化线之间,部分落到上地壳演化线与造山带演化线之间。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造模式图上(图5b),Pb同位素组成投点基本上都落到靠近造山带演化线一边,表明矿石的最初铅和主要铅应来自造山环境,源区属于以幔源铅为主的壳幔混合源,这也证明成矿过程中可能有壳源物质的加入。特别需要提及的是,在图5a、b中Pb同位素组成的投点近于直线排列,显示 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 之间具正相关关系,这一特点与富碱斑岩的Pb同位素组成特点极为相似,被解释为是地壳和地幔各个储库具有均匀混合趋势的一种

表2 北衙金、铜多金属矿床的硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic composition of ores from Beiya gold, copper-polymetallic deposit

| 序号 | 矿段 | 样品号 | 矿物 | $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}\text{‰}$ | 序号 | 矿段 | 样品号 | 矿物 | $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}\text{‰}$ |
|----|-----|---------|-----|--|----|-----|----------|-----|--|
| 1 | 万碛山 | WDS-1 | 黄铁矿 | 2.7 | 11 | 万碛山 | WS2 | 黄铁矿 | 4.5 |
| 2 | 万碛山 | WDS-5 | 黄铁矿 | 2.2 | 12 | 万碛山 | WS1 | 黄铁矿 | 0.49 |
| 3 | 万碛山 | WDS-5 | 方铅矿 | 1.4 | 13 | 万碛山 | WS4 | 黄铁矿 | -1.58 |
| 4 | 万碛山 | WDS-10 | 黄铁矿 | 3.6 | 14 | 万碛山 | WS3 | 黄铁矿 | 1.2 |
| 5 | 马头湾 | MTW-2 | 黄铁矿 | 0 | 15 | 红泥塘 | hs1 | 方铅矿 | 0.56 |
| 6 | 陈家坡 | ZK3-1 | 黄铁矿 | 2.5 | 16 | 笔架山 | bs2 | 方铅矿 | -1.4 |
| 7 | 陈家坡 | ZK3-2 | 方铅矿 | 1.0 | 17 | 红泥塘 | hs2 | 方铅矿 | 0.6 |
| 8 | 陈家坡 | ZK3-3 | 方铅矿 | 1.2 | 18 | 锅厂河 | gc1 | 方铅矿 | -2.4 |
| 9 | 万碛山 | WD687-7 | 黄铜矿 | 1.2 | 19 | 万碛山 | WD567-8 | 黄铁矿 | 1.5 |
| 10 | 万碛山 | WD607-7 | 黄铁矿 | 1.6 | 20 | 万碛山 | WD567-18 | 黄铁矿 | 2.8 |

注:1-8 由中国地质科学院地质所测试,11-18 引自刘秉光等(1999),9-10,19-20 引自徐受民(2007)。

表3 北衙金铜多金属矿床矿石矿物铅同位素组成
Table 3 Lead isotopic composition of ores from the Beiya gold, copper-polymetallic deposit

| 序号 | 样品编号 | 样品名称 | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ |
|----|----------|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | WDS-1 | 黄铁矿 | 39.0101±0.0015 | 15.6816±0.0005 | 18.6722±0.0007 |
| 2 | WDS-5 | 黄铁矿 | 39.0177±0.0018 | 15.6834±0.0007 | 18.6689±0.0008 |
| 3 | WDS-5 | 方铅矿 | 39.0169±0.0014 | 15.6808±0.0006 | 18.6633±0.0007 |
| 4 | ZK3-1 | 黄铁矿 | 38.9603±0.0027 | 15.6689±0.0011 | 18.6277±0.0013 |
| 5 | ZK3-2 | 方铅矿 | 39.0394±0.0016 | 15.6797±0.0005 | 18.6677±0.0008 |
| 6 | ZK3-3 | 方铅矿 | 39.0327±0.0018 | 15.6816±0.0006 | 18.6668±0.0007 |
| 7 | ZK3-3(1) | 方铅矿 | 39.0327±0.0014 | 15.6819±0.0005 | 18.6675±0.0006 |
| 8 | WDS-10 | 黄铁矿 | 39.0106±0.0032 | 15.6796±0.0012 | 18.6620±0.0014 |
| 9 | WD-25-5 | 方铅矿 | 38.743±0.0008 | 15.603±0.0003 | 18.564±0.0004 |
| 10 | WD-25-4 | 方铅矿 | 38.604±0.0034 | 15.553±0.0013 | 18.481±0.0012 |
| 11 | WD-25-3 | 方铅矿 | 38.781±0.0010 | 15.612±0.0003 | 18.571±0.0003 |
| 12 | WD-25-2 | 方铅矿 | 38.755±0.0009 | 15.596±0.0004 | 18.558±0.0004 |
| 13 | WD-25-1 | 方铅矿 | 38.591±0.0009 | 15.545±0.0003 | 18.501±0.0004 |
| 14 | WD-27 | 方铅矿 | 38.555±0.0028 | 15.532±0.0014 | 18.496±0.0013 |
| 15 | WD-26-1 | 方铅矿 | 38.605±0.0017 | 15.540±0.0007 | 18.493±0.0008 |
| 16 | WD-28-3 | 黄铁矿 | 38.256±0.0021 | 15.654±0.0008 | 18.673±0.0008 |
| 17 | WD-28-1 | 黄铁矿 | 38.973±0.0019 | 15.666±0.0007 | 18.655±0.0007 |
| 18 | WD-10-3 | 方铅矿 | 38.819±0.0016 | 15.615±0.0007 | 18.585±0.0006 |
| 19 | WD-10-2 | 方铅矿 | 38.743±0.0016 | 15.491±0.0006 | 18.567±0.0005 |
| 20 | WD-10-1 | 方铅矿 | 38.831±0.0020 | 15.597±0.0008 | 18.591±0.0010 |
| 21 | WD-17 | 黄铁矿 | 38.720±0.0016 | 15.614±0.0007 | 18.575±0.0007 |
| 22 | WD-24-1 | 黄铁矿 | 38.700±0.0021 | 15.620±0.0008 | 18.535±0.0008 |
| 23 | WD-24-2 | 黄铁矿 | 38.675±0.0014 | 15.579±0.0006 | 18.546±0.0005 |
| 24 | WD-24-4 | 黄铁矿 | 38.824±0.0054 | 15.626±0.0012 | 18.569±0.0012 |
| 25 | HN-28 | 方铅矿 | 38.930±0.0023 | 15.664±0.0009 | 18.644±0.0008 |
| 26 | HN-18-4 | 方铅矿 | 38.748±0.0022 | 15.606±0.0008 | 18.555±0.0010 |
| 27 | HN-18-13 | 方铅矿 | 38.811±0.0013 | 15.601±0.0005 | 18.553±0.0006 |
| 28 | HN-18-9 | 方铅矿 | 38.904±0.0015 | 15.651±0.0006 | 18.628±0.0006 |
| 29 | HN-18-7 | 方铅矿 | 38.732±0.0020 | 15.586±0.0008 | 18.538±0.0007 |
| 30 | HN-18-6 | 方铅矿 | 38.673±0.0036 | 15.560±0.0014 | 18.513±0.0016 |
| 31 | HN-18-3 | 方铅矿 | 38.766±0.0011 | 15.611±0.0004 | 18.587±0.0004 |
| 32 | HN-18-2 | 方铅矿 | 38.909±0.0018 | 15.648±0.0007 | 18.627±0.0008 |
| 33 | HN-18-1 | 方铅矿 | 38.830±0.0014 | 15.630±0.0006 | 18.614±0.0006 |
| 34 | HN-23-1 | 方铅矿 | 38.422±0.0037 | 15.457±0.0014 | 18.380±0.0008 |
| 35 | HN-23-8 | 方铅矿 | 38.718±0.0021 | 15.575±0.0008 | 18.562±0.0008 |
| 36 | HN-23-5 | 方铅矿 | 38.904±0.0039 | 15.653±0.0012 | 18.626±0.0013 |
| 37 | HN-23-4 | 方铅矿 | 38.624±0.0012 | 15.553±0.0004 | 18.514±0.0005 |
| 38 | HN-23-3 | 方铅矿 | 38.815±0.0047 | 15.703±0.0012 | 18.665±0.0014 |
| 39 | HN-23-2 | 方铅矿 | 38.942±0.0019 | 15.663±0.0008 | 18.634±0.0008 |

* 1-7 为本次工作成果,由中国地质科学院地质所同位素室测试;8-39 引自吴开兴(2005)。

反映(高建国等,2000,徐受民等,2007)。此外,不同矿段不同类型矿床的硫化物铅同位素与该区富碱斑岩的铅同位素在图上的排列规律和变化趋势十分相似(图5a、b),反映富碱岩岩浆和成矿流体中的铅同位素具有亲缘性,或者说二者的初始铅同位素来源于相似的源区。这就进一步证明成矿流体主要来自富碱斑岩的分异作用。

北衙矿区发育了一套铁化灰岩。李景虹等(1991)、刘秉光等(1999)和吴开兴等(2005)研究指出,铁化和黄铁绢英化是该矿区重要的近矿围岩热液蚀变,其铁化灰岩中Pb的含量比未蚀变的灰岩高出2个数量级,因此认为铁化灰岩中的铅主要是由流体带来的。而富碱斑岩的黄铁绢英化是在高水/岩比的条件下发生的,其铅同位素组成基本可以代表流体端元的铅同位素组成。图6a、b显示了北衙矿区矿石及铁化灰岩、黄铁绢英化斑岩及矿区出露的其它岩石(未蚀变灰岩,砂页岩和玄武岩)的Pb同位素分布。由图6a、b可以看出,矿石与蚀变灰岩、蚀变斑岩的Pb同位素组成范围和分布趋势基本一致,矿石与未蚀变富碱斑岩的铅同位素组成也十分相似,但与未蚀变的砂页岩和灰岩的Pb同位素组成明显不同。这进一步证明成矿流体与富碱斑岩具有密切的亲缘关系。

4 成矿物质和成矿流体的来源及演化

关于斑岩型矿床成矿流体和成矿物质来源问题,早期存在了两种不同的模型。一种称为对流模式,认为成矿流体来源于天水和地下水,成矿物质来自加热的以天水为主的循环流体对围岩的汲取,岩浆仅具有热源作用。另一种称为正岩浆模式,认为斑岩型矿床的成矿流体和成矿物质均来自深部岩浆,是由富碱斑岩岩浆分异过程中演化而来的(高建国等,2000,吴开兴等,2005;芮宗瑶等,2006)。愈来愈多的研究事实证明,斑岩型矿床的成矿作用通常都经历了早期岩浆热液阶段和晚期大气水阶段,其成矿流体主要来自岩浆。然而有关成矿物质是来自岩浆带来的?还是通过流体的对流循环从围岩中萃取的问题尚存在争议。

在北衙地区,尽管前人已从不同角度对北衙金多金属矿床进行了大量研究,并在矿床成因类型方面取得许多重要进展。然而,有关成矿物质来源问题并没有解决。比如葛良胜等(2002)基于矿区及其外围不同地质体Au的丰度、矿床同位素地球化学特征,以及综合考虑与矿床有关的富碱侵入岩以

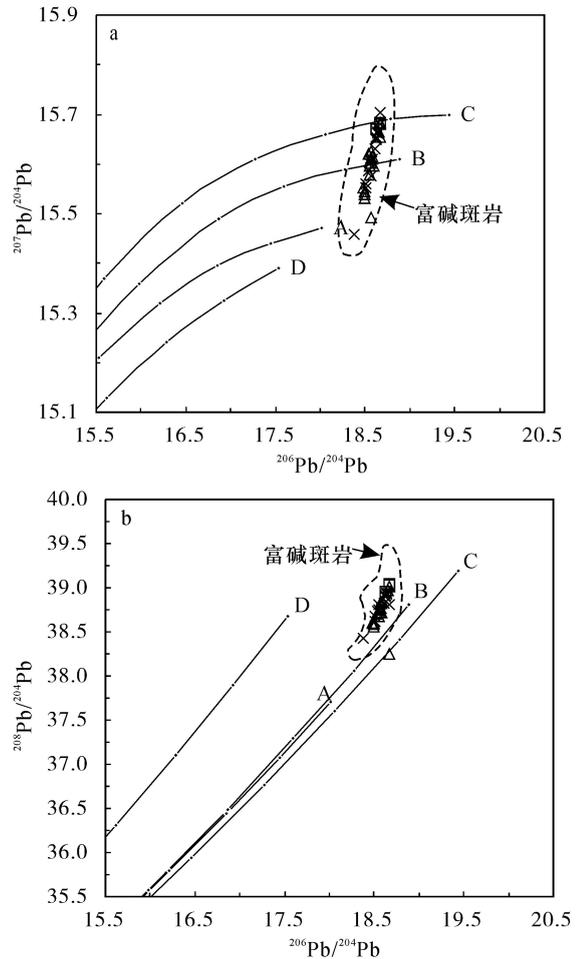


图5 北衙金多金属矿床铅构造模式图(图中富碱斑岩界线数据来自肖晓牛(2009))

Fig. 5 Projection diagram showing Pb isotope composition of various deposits from Beiya gold-poly-metallic deposit (data for boundary of alkali-rich porphyries after Xiao *et al.*, 2009)

A-地幔;B-造山带;C-上地壳;D-下地壳;△-万洞山;□-陈家庄;x-红泥塘

A-mantle; B-orogenic belt; C-upper crust; D-lower crust;

△-Wandongshan; □-Chenjiazhuang; x-Hongnitang

小岩枝或岩脉为主,本质上难以提供足够数量金的事实,认为成矿元素和成矿流体均来自与富碱斑岩相同的深部,源区可能是地幔或壳幔混合带。岩浆在成矿流体上升过程中只扮演了载体和热机的角色;而徐受民(2007)、吴开兴(2005)、依据矿区流体包裹体气液相成分以及矿床同位素地球化学研究,提出成矿物质和成矿流体均来自富碱斑岩岩浆的分异作用。

近年来,随着对斑岩型矿床研究的深入,有关成矿物质来自岩浆的证据逐渐增多(Rombach C S, *et*

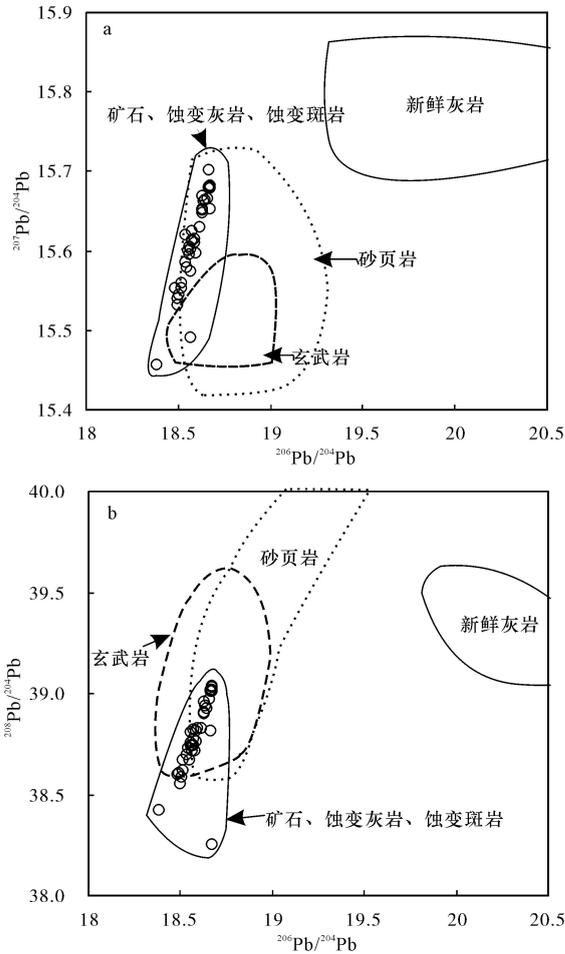


图6 北衙矿区矿石及蚀变灰岩、蚀变斑岩与围岩的Pb同位素关系图(图中界线引自吴开兴(2005))

Fig. 6 Relationship between Pb isotope composition from ores and altered limestone and porphyries (boundary after Wu *et al.*, 2005)

al., 2001; 葛良胜等, 2002; Tarkian M, *et al.*, 2003; Heinrich C. 2005; 芮宗瑶等, 2006, 徐受民, 2007), 正岩浆模型的观点获得大多数学者的认同。北衙金多金属矿床是一个以斑岩型矿床为中心, 由热液型、矽卡岩型、交代蚀变岩型和隐爆角砾岩型等多种不同成因类型的矿床在空间上紧密共生构成的一个成矿系列。从不同矿段不同类型矿床硫化物矿石黄铁矿、黄铜矿以及方铅矿的硫同位素变化范围较窄 ($\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-2.4\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$ 之间), 平均为 1.18‰ , 与富碱斑岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近, 说明矿石与斑岩具有相似的深部初始硫源。硫化物矿石黄铁矿、方铅矿的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别落在 $38.256 \sim 39.0394$, $15.457 \sim 15.703$ 和 $18.380 \sim 18.673$ 之间, 也显示了比较均一稳定的铅同位素特征, 且与含矿斑岩的 Pb 同位素比值十分相近, 也

指示了矿石和富碱斑岩的铅具有相同的来源。在铅同位素构造模式图上, 本区 Pb 同位素投点主要集中在地幔和造山带演化线之间, 部分落在造山带与上地壳区间, 推测与富碱斑岩岩浆和成矿流体及成矿物质沿深大断裂上升运移过程中, 遭受了不同程度地壳铅的混染有关。因此有些样品显示了壳幔混合源特征。显而易见, 矿石和富碱斑岩的 S 和 Pb 同位素组成一致揭示, 北衙地区原生矿床成矿物质具有与富碱斑岩相同的来源, 即来自于深部地幔或壳幔混合带。对流体包裹体的稀土和微量元素地球化学的分析和研究表明, 成矿流体早期以岩浆流体为主, 晚期可能有大气降水的混合。因此, 在北衙金多金属矿床的成矿过程中, 富碱斑岩岩浆不仅为含矿流体的上升提供了动力和热能, 同时也是成矿物质和成矿流体的主要来源。

5 结论

(1) 通过对流体包裹体稀土微量元素的测试, 确定北衙金、铜多金属矿床中的流体具有富集轻稀土和大离子亲石元素的特征, 结合已有的流体包裹体盐度分析结果, 推测该区成矿流体来自富碱斑岩的分异作用;

(2) 对硫化物矿石中黄铁矿、方铅矿和黄铜矿进行了 S、Pb 同位素测试, 结果显示本区矿石 S 同位素 ($\delta^{34}\text{S}$) 落在 $-2.4\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$ 范围内, 不同矿段不同硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化小, 均比较接近幔源硫(或陨石硫)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (0‰)。硫化物矿石的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别变化在 $38.256 \sim 39.0394$, $15.457 \sim 15.703$ 和 $18.380 \sim 18.673$ 之间, 在 Pb 同位素构造模式图中, 本区矿石 Pb 同位素均落到造山带演化线一边或造山带与地壳演化线之间, 表明矿石的铅同位素主要来自造山带, 应属于以幔源铅为主的壳幔混合源;

(3) 结合已有的研究资料, 对北衙多金属矿床成矿流体与成矿物质的来源进行了初步讨论, 指出北衙地区原生矿床成矿物质与富碱斑岩一样来自于深部地幔或壳幔混合带。成矿流体早期以岩浆流体为主, 晚期可能有大气降水的混合。北衙金多金属矿床的成矿过程中, 富碱斑岩岩浆不仅为含矿流体的上升提供了动力和热能, 同时也是成矿物质和成矿流体的主要来源。

[References]

Cai Xin-ping, Liu Bing-guang and Ji Chen-yun. 1991. Preliminary study on characteristics and genesis of Au deposit in Beiya area,

- western Yunnan province[J]. *Au Science and Technology*, 7: 15-20
- Cai Xin-ping. 1993. Characteristics, genesis and prospecting of Beiya gold deposit, western Yunnan. *Geology and Geochemistry of gold deposits in China*[J]. Beijing: Science Press; 134-151 (in Chinese)
- Gao Jian-guo, Xia Ji-shen, Chen Chang-yong. 2000. Geochemical features of alkali-rich porphyry and analysis of Au (polymetallic) deposits in western Yunnan [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24 (supp.): 44-50 (in Chinese with English abstract)
- Ge Liang-sheng, Guo Xiao-dong, Zou Yi-ling, Li Zhen-hua, Zhang Xiao-hui. 2002. Geological characteristics and genesis of Beiya gold deposit, Yunnan province [J]. *Contributions to Geology and Mineral research*, 17(1): 32-46 (in Chinese with English abstract)
- Heinrich C. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study[J]. *Mineral Deposits*, 39: 864-889.
- Li Jing-hong, Li Ru-liang, Shao Wei-nian. 1991. Geological characteristics of gold deposits in Beiya, Heqing county, Yunnan Province, and their mineralization mechanism[J]. *Geology and Mineral Resources in Southwest China*, 5(2): 50-55
- Lv Bo-xi, Duan Jian-zhong, Pan Chang-yun. 1993. The granitoids in the Sanjiang region and their metallogenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House; 1-328 (in Chinese)
- Liu Bing-guang, Lu De-fu, Cai Xin-ping. 1999. Study on gold deposit in western Yunnan and Sichuan province [M]. Beijing: Ocean Press; 1-241 (in Chinese)
- Li Xin-jun and Liu Wei. 2002. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of Mazhuangshan gold deposit eastern Tianshan Mountain of China [J]. *Acta petrologica Sinica*, 18(4): 551-558 (in Chinese with English abstract)
- Li Xiao-feng, MAO Jing-wen, Zhu He-ping and Wang Rui-ting. 2005. Characteristics of rare earth elements in fluids inclusion of the Heijintaizi gold deposit, Daduhe areas, Sichuan province [J]. *Acta petrologica et mineralogical*, 24(4): 311-318 (in Chinese with English abstract)
- Lian Jian-guo, Shi Wei-quan, Men Shu-ning, Liu Li. 2005. Fluid inclusions in the Dazhuangzi gold deposit in Pingdu county, Shandong [J]. *Geology and prospecting*, 41(1): 28-32 (in Chinese with English abstract)
- Ma De-yun, Han RUN-sheng. 2001. Study on the features of tectonogeochemistry of Beiya gold deposit and enclosing metallogenic targets [J]. *Geology and prospecting*, 37(2): 64-68 (in Chinese with English abstract)
- Rui Zong-yao, Zhang Hong-tao, Chen Ren-yi, Wang Zhiliang, Wang Long-sheng. 2006. An approach to some problems of porphyry copper deposits[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 491-500 (in Chinese with English abstract)
- Rombach C S, Newberry R J. 2001. Shotgun deposit: granite porphyry-hosted gold-arsenic mineralization in southwestern [J]. *Alaska, USA. Mineral Depos*, 36: 607-621
- Tarkian M, Hunken H, Tokmakchieva M. 2003. Precious-metal distribution and fluid-inclusion petrography of Elatsite porphyry copper deposit[J]. *Bulgaria. Mineral Depos*, 38: 261-281
- Wang Li-juan, Wang Jing-bing, Wang Yu-wang. 2002. Study on ore-forming fluid in Caijiaying lead-zinc-silver deposit, Hebei province [J]. *Mineral deposits*, 21 (suppl.): 1037 ~ 1040. (in Chinese with English abstract)
- Wang Shu-lai, Wang Jing-bin, Peng Sheng-ling, Guo Zheng-lin, Chou Yin-jiang. 2004. REE geochemistry of ore fluids in the Kokatag lead-zinc deposit, Xinjiang [J]. *Geology in China*, 31(3): 308-314 (in Chinese with English abstract)
- Wu Kai-xing, Hu Rui-zhong, Bi Xian-wu, Peng Jian-tang, Su Wen-chao, Chen Long. 2005. Study of the fluid inclusions in altered porphyries in the Beiya gold deposit, western Yunnan [J]. *J Mineral Petrol*, 25(2): 20-26 (in Chinese with English abstract)
- Xiao Qing-hua, Hui Wei-dong. 2007. Study on the metallogenesis of the magmatic ore-forming fluids [J]. *Nonferrous Metal in Xinjiang Province*, 4: 13-17
- Xu Shou-min. 2007. Metallogenic modeling of the Beiya gold deposit in western Yunnan and its relation to the Cenozoic alkali-rich porphyries [M]. *China University of Geoscience*, 1-96
- Xu Xingwang, CAI Xiping, ZHANG Baolin, LIANG GuangHe, DU ShiJun and WANG Jie, 2007. Genetic types and framework model of Beiya gold ore district in Western Yunnan [J], *Mineral Deposits*, 26(3): 249-264 (in Chinese with English abstract)
- Xiao Xiao-niu, Yu Xue-hui, Mo Xuanxue, Huang Xing-kai, Li-yong. 2009. A study of fluid inclusions from Beiya gold-polymetallic deposit in Western Yunnan [J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 250-261 (in Chinese with English abstract)
- Yan Jian-guo, Cui Yin-liang, Chen Xian-sheng. 2003. Metallogenic prognosis and target optimum at Beiya gold deposit in Yunnan province, China [J]. *Geology and prospecting*, 39(1): 10-13 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Xiao-ou. 1989. Ore-bearing property study of oxidation zone of the Beiya lead deposit, Yunnan [J]. *Geology and prospecting*, 25(6): 1-8 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 蔡新平, 刘秉光, 季成云. 1991. 滇西北衙金矿矿床特征及成因初探 [J]. *黄金科技动态*, 7: 7-19
- 蔡新平. 1993. 滇西北衙金矿矿床特征、成因及找矿远景预测 [M]. *中国金矿地质地球化学研究* [M] 北京: 科学出版社 134-151
- 高建国, 夏既胜, 陈昌勇. 2000. 滇西富碱斑岩地球化学特征与金(多金属)矿成矿分析 [J]. *大地构造与成矿学*, 24(增刊): 44-50
- 葛良胜, 郭晓东, 邹依林, 李振华, 张晓辉. 2002. 云南北衙金矿床地质特征及成因研究 [J]. *地质找矿论丛*, 17(1): 32-46
- 李景虹, 李如良, 邵伟年. 1991. 云南鹤庆北衙金矿地质特征及成矿机制探讨 [J]. *西南矿产地质*, 5(2): 50-55
- 吕伯西, 段建中, 潘长云. 1993. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性 [M]. 北京: 地质出版社: 1-328
- 刘秉光, 陆德复, 蔡新平. 1999. 滇川西部金矿床研究 [M]. 北京: 海洋出版社: 1-241
- 李新俊, 刘伟. 2002. 东天山马庄山金矿床流体包裹体和同位素

- 地球化学研究及其对矿成因的制约[J]. 岩石学报, 18(4):551-558
- 李晓峰,毛景文,朱和平,王瑞廷. 2005. 四川大渡河黑金台子金矿成矿流体稀土元素地球化学[J]. 岩石矿物学杂志,24(4):311-318
- 连建国,史维全,门树宁,刘 莉. 2005. 山东省平度市大庄子金矿流体包裹体研究[J]. 地质与勘探,41(1):28-32
- 马德云,韩润生. 2001. 北衙金矿床构造地球化学特征及靶区优选[J]. 地质与勘探,37(2):64-68
- 芮宗瑶,张洪涛,陈仁义,王志良,王龙生. 2006. 斑岩铜矿研究中若干问题探讨[J]. 矿床地质, 25(4):491-500
- 王莉娟,王京彬,王玉往. 2002. 河北蔡家营铅锌银矿床流体包裹体研究[J]. 矿床地质,21(增刊):1037-1040.
- 王书来,王京彬,彭省临,郭正林,仇银江. 2004. 新疆可可塔勒铅锌成矿流体稀土元素地球化学[J]. 中国地质,31(3):308-314
- 吴开兴,胡瑞忠,毕献武,彭建堂,苏文超,陈 龙. 2005. 滇西北衙金矿蚀变斑岩中的流体包裹体研究[J]. 矿物岩石,25(2):20-26
- 肖庆华,惠卫东. 2007. 试论岩浆流体成矿作用[J]. 新疆有色金属, 4:13-17
- 徐受民. 2007. 滇西北衙金矿床的成矿模式及与新生代富碱斑岩的关系[D]. 北京:中国地质大学(北京):1-96
- 徐兴旺,蔡新平,张宝林,梁光河,杜世俊,王 杰,2007. 滇西北衙金矿床类型与结构模型[J]. 矿床地质,26(3):249-264
- 肖晓牛,喻学惠,莫宣学,黄行凯,李 勇. 2009. 滇西北衙金多金属矿床流体包裹体研究[J]. 地学前缘,16(2):250-261
- 晏建国,崔银亮,陈贤胜. 2003. 云南省北衙金矿床成矿预测和靶区优选[J]. 地质与勘探,39(1):10-13
- 赵晓鸥. 1989. 云南北衙铅矿氧化带含金性研究[J]. 地质与勘探, 25(6):1-8

Geochemical Characteristics of Metallogenesis in the Gold-Polymetallic Deposit in Beiya, Western Yunnan Province

XIAO Xiao-niu^{1,2}, YU Xue-hui², MO Xuan-xue², HUANG Xing-kai², LI Yong²

(1. East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-ferrous, Nanjing, Jiangsu 210007;

2. State key laboratory of Geological process and Mineral Resource and Key laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobng Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract: The Beiya gold-polymetallic deposit is one of the typical deposits related to Cenozoic alkali-rich porphyry along the Jingsha River-Ailaoshan-Red river fault system in western Yunnan Province. This presents measurements on the trace elements of fluid inclusions and S-Pb isotopes of ores, and discusses the characteristics of ore-forming fluids and the material sources of ore formation. The results show that the total REE abundance is relatively low, with a range from 5.19 to 9.0×10^{-6} , whilst LREE/HREE and $(La/Yb)_N$ reflecting fraction between LREE and HREE vary from 4.121 to 11.249 and from 9.563 to 17.651, respectively. The distribution patterns of REE display a LREE-enriched trend, which is roughly consistent with that of alkali-rich porphyries. The $\delta^{34}S$ values are in the range of $-2.4 \sim 4.5\%$ and the $^{208}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ and $^{206}Pb/^{204}Pb$ values range from 38.256 to 39.0394, from 15.457 to 15.703, and from 18.380 to 18.673, respectively. There is no obvious variation in the sulfur and lead isotopic composition for different sulfides (pyrite, galena and chalcopyrite) from different ore blocks, and the S-Pb isotopic compositions are also very similar to that of alkali-rich porphyries. In combination with the previous studies of fluid inclusions, it could be concluded that alkali-rich porphyry magma not only provides a driving force and heat for the rise of ore-bearing fluids, but also acts as the main source and carrier for the ore-forming material and mineralization fluid.

Key words: gold polymetallic deposit, trace elements and rare earth elements, sulfur and lead isotope, Beiya in western Yunnan