

西藏当雄地区拉屋矿床磁黄铁矿Re-Os同位素测年和成矿物质来源示踪

崔玉斌¹, 赵元艺², 屈文俊³, 刘伟⁴, 叶荣¹, 刘妍²

CUI Yu-bin¹, ZHAO Yuan-yi², QU Wen-jun³, LIU Wei⁴, YE Rong¹, LIU Yan²

1. 中国地质大学(北京)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. 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037;

4. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450007

1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. National Research Center of Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450007, Henan, China

摘要:拉屋矿床位于西藏自治区当雄县境内,大地构造位置处于冈底斯成矿区申扎-旁多铜、银、铅、锌、金成矿带,为大型矽卡岩型铜铅多金属矿床。在系统研究拉屋矿床地质地球化学特征的基础上,以矿石的磁黄铁矿为对象,测定Re-Os同位素年龄,获得等时线年龄数据为 $(309 \pm 31) \text{ Ma}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的初始值为 0.51 ± 0.12 , γ_{Os} 值为 $306.90 \sim 880.29$, Re/Os为 $20.46 \sim 80.46$ 。上述结果,结合矿区野外地质特征和稳定同位素特征,证明拉屋矿床主要形成于晚石炭世来故期,其成矿物质来源于地幔,并在喷流过程中与地壳海底卤水汇合,遭受了壳源物质的混染,形成喷流成因矽卡岩型矿床。

关键词:Re-Os同位素测年;成矿物质;矿床成因;铜铅锌多金属矿床;拉屋矿床

中图分类号:P618.41; P618.42; P597+.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)08-1283-11

Cui Y B, Zhao Y Y, Qu W J, Liu W, Ye R, Liu Y. Re-Os dating and ore-forming material tracing of the Lawu ore deposit in Damxung area, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(8):1283-1293

Abstract: The Lawu ore deposit is located in Damxung County of Tibet and within the Shenzha-Pangduo Cu-Ag-Pb-Zn-Au ore-forming belt in the Gangdise metallogenic district. A $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ isochron of $309 \pm 31 \text{ Ma}$ was obtained for samples of pyrrhotite from the Lawu district, with the initial value being $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, γ_{Os} values and Re/Os ratios being 0.51 ± 0.12 , $306.90 \sim 880.29$ and $20.46 \sim 80.46$, respectively. In combination with the field geological and stable isotopic features, the Lawu ore deposit is considered to have been formed in Late Carboniferous Laigu period, and the ore-forming materials were probably derived from the mantle and severely contaminated by the crust, thus forming a sedex skarn ore deposit.

Key words: Re-Os dating; ore-forming material; deposit genesis; copper-lead-zinc ore deposit; Lawu ore deposit

收稿日期:2011-03-21;修订日期:2011-06-24

资助项目:国家“973”计划项目《青藏高原南部大陆聚合与成矿作用》之课题三《青藏高原南部增生造山成矿系统发育机制》(编号:2011CB403103)、国家科技支撑课题《西藏班公湖岛弧带铜、金、富铁矿评价与综合找矿技术方法示范研究》(编号:2006BAB01A05)之专题《区域成矿模型与典型矿床成因模型研究》和中国地质调查局青藏专项《西藏班公湖-怒江成矿带找矿远景区评价》(编号:1212010818097)

作者简介:崔玉斌(1986-),男,在读硕士,专业方向:矿床学和矿床地球化学。E-mail:cuiyubin1986@sina.com

通讯作者:赵元艺(1966-),男,研究员,从事矿床学、地球化学研究。E-mail:yuanyizhao2@sina.com

拉屋矿床位于西藏当雄县乌玛塘乡境内,大地构造位置处于冈底斯弧背断隆带即隆格尔-念青唐古拉复合古岛弧带,为大型矽卡岩型铜铅多金属矿床。该矿床于 1996 年由河南省地质调查院发现,现由西藏华钰矿业有限公司负责进行开采,是西藏北部少数几个正在开采的有色金属矿床之一。

最近几年,随着对冈底斯弧背断隆带即隆格尔-念青唐古拉复合古岛弧带研究程度的加强,前人对拉屋矿床进行了构造、稳定同位素、稀土元素、流体包裹体和年代学方面的研究,试图解释其成因。杜欣等^[1]测得拉屋铜铅锌多金属矿床白云母二长花岗岩 K-Ar 全岩年龄为 $109\text{Ma} \pm 1.3\text{Ma}$,认为拉屋矿床是燕山期形成的矽卡岩型铜铅锌多金属矿床;何国朝等^[2]对拉屋矿区进行了构造方面的研究,认为拉屋矿床为喷流沉积后期热液叠加改造型矿床;连永牢等^[3]对拉屋矿区进行稳定同位素和稀土元素方面的研究,认为拉屋矿床为喷流沉积-岩浆热液叠加改造型矿床。从拉屋矿床现有的研究成果来看,对矿床的成因存在争议和分歧,归因于缺少成矿年龄数据。

本文通过对拉屋矿区硫化物矿石的 Re-Os 同位素年龄测定,厘定成矿时代,并进行成矿物质来源研究,为深入探讨矿床成因提供基础证据。

1 矿床地质特征

西藏的大地构造位置属于欧亚板块与印度板块的结合部位,整体上可以分出 2 个一级铜多金属成矿远景区,即北部的班公湖-怒江成矿区与南部的冈底斯成矿区。冈底斯成矿区又可进一步划分为 3 个成矿带:①班戈-那曲铜铬银铅锌成矿带、②申扎-旁多铜银铅锌金成矿带和③谢通门-墨竹工卡铜铁铅锌金成矿带。其中拉屋矿床位于申扎-旁多铜铁铅锌金成矿带中(图 1)^[2]。

矿区出露的地层为石炭系旁多群和二叠系洛巴堆组。其中石炭系旁多群的主要岩性为石英砂岩、绢云母石英板岩、大理岩,二叠系洛巴堆组的岩性主要为石英砂岩、泥质粉砂质板岩和长石石英砂岩。在矿区地层总体走向为北西西向,并构成以白云母二长花岗岩为轴部的不对称的背斜构造。矿区的断裂有北西和北北东向 2 组,其中北西向断裂以 F_3 断层为代表,该方向的断层为成矿前断裂,其内部分区段被

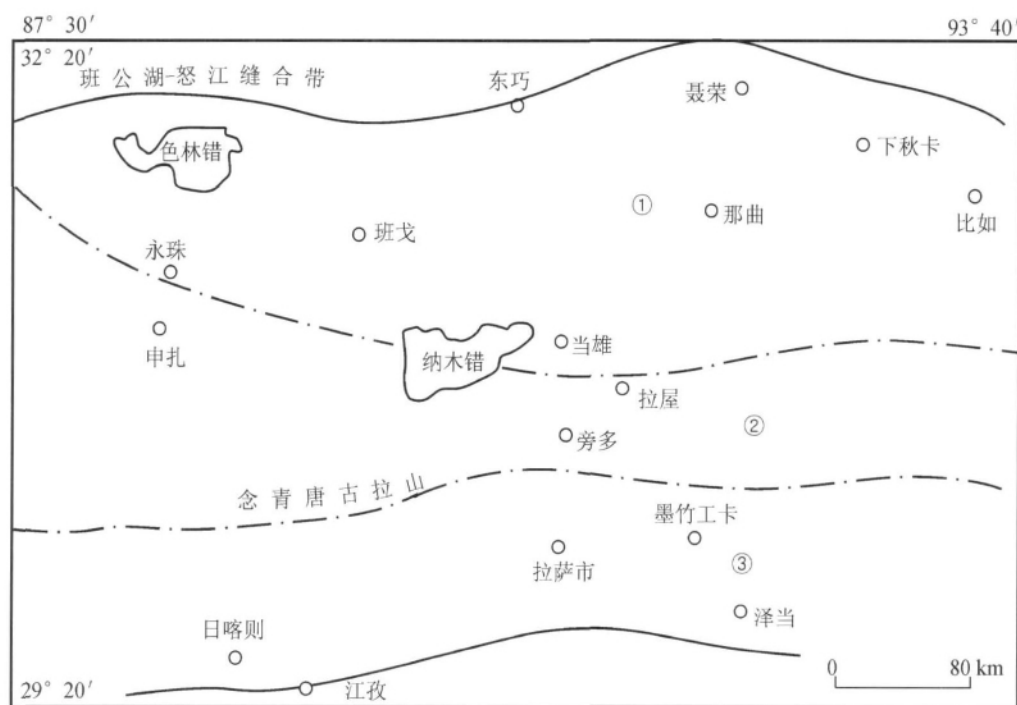


图 1 拉屋矿床在西藏自治区的位置示意图(底图据参考文献[2]改绘)

Fig. 1 Location of the Lawu ore deposit in Tibet

①班戈-那曲铜铬银铅锌成矿带;②申扎-旁多铜银铅锌金成矿带;③谢通门-墨竹工卡铜铁铅锌金成矿带

矿体所充填^[4](图2);北北东向断裂地表未见出露,形成时间应在背斜形成之后和矿体形成之前^[4]。矿区出露的岩体为白云母二长花岗岩,属于矿区东部日音拿岩体的西延部分,岩体出露面积6km²,为燕山期的产物。岩体周围的地层普遍有蚀变现象,碳酸盐类岩石蚀变为矽卡岩和大理岩。矽卡岩主要分布于背斜的核部与两翼。矿体主要赋存于矽卡岩中。

拉屋矿区的矿体共为6条,主要分布于F₃断裂的北部,呈似层状或透镜状较为规整地东西向展布。矿体主要受断裂与矽卡岩的控制,矿体长度一般为700~4900m,厚度为8.18~15.08m,分布于矿区东西向背斜的两翼。主成矿元素由南至北出现Cu→Cu、Zn→Zn→Zn、Pb→Pb、Zn、Ag的元素分带(表1)。

矿石具中—粗粒、自形—半自形粒状结构,块状、条带状、斑杂状及碎裂构造。矿石矿物为闪锌矿、黄铜矿、蓝铜矿、黄铁矿等,脉石矿物为钙铁榴石、透辉石、纤闪石、方解石、石英。金属矿物中闪锌矿粒度较大,多为自形、半自形晶,与黄铜矿共生;黄铜矿呈它形粒状结构,以团粒状、星散浸染状嵌布于矽卡岩内,近地表因氧化次生为孔雀石。矿石自然类型为原生硫化矿石,矿化较好的部位呈致密块状构造,边部矿化较弱的部位以浸染状、团粒状构造为主。矿体围岩主要为矽卡岩、大理岩。围岩蚀变有硅化、矽卡岩化、绿泥石化及绿帘石化。

2 样品与分析测试

2.1 样品与测试方法

本文的样品采自拉屋矿床正在开采的4410平硐,采样方法为单点捡块采样,样品采自 号矿体(图2),为致密块状的磁黄铁矿矿石。从4件样品中分别挑选磁黄铁矿单矿物进行了Re-Os同位素直接定年。

同位素年龄测试在国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室完成,Re、Os化学分离步骤和质谱测定请参考文献[5-8]。现简述如下。



图2 拉屋矿区地质图(底图据参考文献[4]改绘)

Fig. 2 Geological map of the Lawu ore district

1—第四系;2—二叠系洛巴堆组石英砂岩、长石石英砂岩;3—石炭系旁多群泥质砂板岩;4—大理岩;5—矽卡岩;6—燕山晚期白云母二长花岗岩;7—矿(化)体及编号;8—实测断层及编号;9—推测断层及编号;10—地质界线;11—产状

(1) 分解样品

准确称取待分析样品,通过长细颈漏斗加入到Carius管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶)的底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到-50~-80℃。放装好样的Carius管到该保温杯中,通过长细颈漏斗把准确称取的¹⁸⁵Re和¹⁹⁰Os混合稀释剂加入到Carius管的底部,再加入5mL 10mol/L HCl,15mL 16mol/L HNO₃,5mL 30% H₂O₂,当管底溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好Carius管的细颈部分。放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到200℃,保温24h。在底部冷冻的情况下,打开Carius管,并用40mL水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

(2) 蒸馏分离 Os

于105~110℃蒸馏50min,用10mL水吸收蒸出

表 1 拉屋矿床矿体特征
Table 1 Ore body characteristics of the Lawu ore deposit

序号	矿体 编号	矿体形态	矿体规模 (长×厚)/m ²	矿体产状	主成矿元素, 平均品位/%	控矿因素
1	I	似层状	4900×8.18	2~40°∠39~78°	Cu,1.03	F ₃ 断裂, 矽卡岩
2	II	似层状	1000×11.67	290°∠10~20°	Cu,1.02; Zn,10.45	F ₃ 与 F ₅ 断裂, 矽卡岩, 粉砂质板岩, 石英砂岩
3	III	似层状			Zn,5.64	F ₅ 断裂, 矽卡岩
4	IV	似层状	1800×8.76	2~6°∠34°	Zn,3.6; Pb,0.42	矽卡岩
5	V	似层状、 透镜状	1100×14.59	0~6°∠29~42°	Zn,3.43; Pb,0.62	矽卡岩
6	VI	似层状	700×15.08	3~6°∠42°	Zn,4.61; Pb,5.12; Ag,超过工业品位	砂质板岩

注: 据参考文献[1]和[4]整理; 表中矿体编号同图 2

的 OsO₄。用于 ICPMS(等离子体质谱仪测定)测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液倒入 150 mL Teflon 烧杯中待分离 Re。

(3)萃取分离 Re

将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干。重复 2 次以降低酸度。加入 10mL 5mol/L NaOH,稍微加热,转为碱性介质。转入 50mL 聚丙烯离心管中,离心,取上清液转入 120 mL Teflon 分液漏斗中。加入 10mL 丙酮,振荡 1min,萃取 Re。静止分相,弃去水相。加 2mL 5 mol/L NaOH 溶液到分液漏斗中,振荡 2min,洗去丙酮相中的杂质。离心分相,弃去水相。排丙酮到 150mL 已加有 2mL 水的 Teflon 烧杯中。在电热板上 50℃ 加热以蒸发丙酮。加热溶液至干。加数滴浓硝酸和 30%过氧化氢,加热蒸干以除去残存的 Os。用数毫升稀 HNO₃ 溶解残渣,稀释到硝酸浓度为 2%。备 ICPMS 测定 Re 同位素比值。

(4)质谱测定

采用美国热电 HR-ICP-MS 测定同位素比值。对于 Re:选择质量数为 185、187,用 190 监测 Os。对于 Os:选择质量数为 186、187、188、189、190、192,用 185 监测 Re。

(5)实验的监控样 JCBY

JCBY 是采自甘肃省金川铜镍硫化物矿二矿区的网状硫化物矿石,经球磨粉碎后,再进行人工混匀,然后直接分装于棕色玻璃瓶中,采用 N-TIMS、

HR-ICP-MS、MC-ICP-MS 和 ICP-MS 标定。

2.2 测试结果

拉屋矿区的 4 件磁黄铁矿 Re-Os 同位素的测定结果列于表(2),Re 的含量为 $0.0536\times10^{-9}\sim0.1335\times10^{-9}$,Os 的含量为 $0.0013\times10^{-9}\sim0.0265\times10^{-9}$ 。采用 Re 衰变常数为 $1.666\times10^{-11}[9]$,利用 ISOPLLOT 软件[10]将 4 个样品回归成一条直线,拟合的直线线性关系良好,¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 初始比值为 0.51 ± 0.12 。4 件样品的 ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 值的范围相对较大,平均权重方差(MSWD=0.034)的值小,说明获得的等时线年龄比较可靠[11],为 $309\text{Ma}\pm31\text{Ma}$ (图 3)。

3 讨论

3.1 测试结果的可靠性

Re-Os 同位素体系在金属矿床成矿物质来源示踪和直接精确定年方面越来越发挥巨大的作用[12],尤其是近年来随着质谱技术和分析技术方法的进步,使得精确测定具有低含量的 Re-Os 浓度及其同位素组成的硫化物成为可能,并取得丰硕的成果。在国外,Lambert 等[13]、Morgan 等[14]、Freydier 等[15]、Stein 等[16]分别报道了铜镍硫化物矿床、斑岩铜矿和剪切带型金矿中的磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿等的 Re-Os 定年成果,并探讨了成矿金属元素的来源。中国学者 wang 等[17]、张作衡等[18]、丰成友等[19],分别对朝山矽卡岩型金矿、新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床、青海驼路沟喷流沉积型钴(金)矿进行磁黄铁矿、

黄铜矿、黄铁矿等 Re-Os 同位素定年研究,获得了可靠的成矿年龄。

本次样品分析和测试在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,测试结果列于表 2。磁黄铁矿中 Re 的含量为 $0.0536 \times 10^{-9} \sim 0.9295 \times 10^{-9}$, 普 Os 的含量为 $0.0013 \times 10^{-9} \sim 0.0265 \times 10^{-9}$, ^{187}Os 为 $0.0003 \times 10^{-9} \sim 0.005 \times 10^{-9}$, 与 Wang 等^[17](表 2)在朝山金矿测得的磁黄铁矿的数据(Re 为 0.2441~2.6206, 普 Os 为 0.0042~0.08213, ^{187}Os 为 0.0009~0.00852)基本处于同一数量级,表明测试结果是可信的。由于 Re、Os 含量极低,因此实验的空白水平十分重要。本次试验全流程空白水平和标准物质测定见表(3), Re 空白为 0.0028×10^{-9} 和 0.0015×10^{-9} , Os 空白为 0.0037×10^{-9} 和 0.0008×10^{-9} 。实验测得监控样 JCBY 的 Re 含量为 37.81×10^{-9} 和 37.62×10^{-9} , Os 的含量为 16.05×10^{-9} 和 16.06×10^{-9} ,与推荐值十分一致,这对实验结果的可靠性起到重要的监控作用(表 3)。因此,本次所获得的年龄是可靠的。

3.2 年代学和矿床成因

前人对拉屋矿床年代学与成因已有较多的认识。杜欣等^[1]测得拉屋铜铅锌多金属矿床白云母二长花岗岩 K-Ar 全岩年龄为 $109\text{Ma} \pm 1.3\text{Ma}$,并认为拉屋矿床是燕山期形成的矽卡岩型铜铅锌多金属矿床。何国朝等^[2]对拉屋矿区进行了构造方面的研究,认为拉屋矿床为喷流沉积后期热液叠加改造型矿床,但是未获得成矿年代学数据。连永牢等^[3]对拉屋矿区进行稳定同位素和稀土元素方面的研究,也认为拉屋矿床为喷流沉积-岩浆热液叠加改造型矿床,但是也没有成矿年代学数据支持。从拉屋矿床现有的研究成果来看,对矿床成因的争议和分歧的焦点在于该矿床的成矿年龄。

本次研究获得的拉屋矿床的磁黄铁矿 Re-Os 同位素的等时线年龄为 $309\text{Ma} \pm 31\text{Ma}$ (图 3),为晚石炭世。根据野外调查,拉屋矿区的容矿岩石为上石炭统-下二叠统来姑组,受大理岩的控制,矿体呈似层状、层状、透镜状分布,产状与围岩基本一致,且常呈多层平行状产出。矿体围岩中多见有热水沉积岩,主要由硅质岩(图版 -a)、硅质条带、硅质结核灰岩、纹带条带状灰岩、铁白云石岩等组成。这些热水岩与多金属矿体紧密相关,部分地段为全岩矿化,并构成矿区的主矿体(如拉屋矿区、矿体)。拉屋矿区矿石本身具有层纹状、条带状构造等热水沉积结

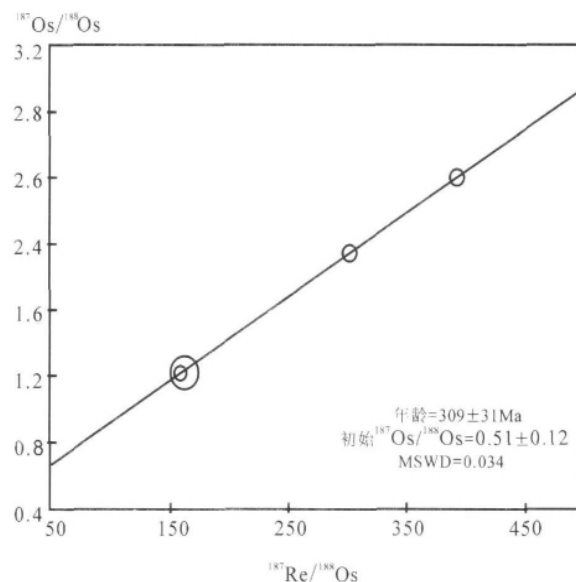


图3 西藏当雄县拉屋矽卡岩型铜多金属矿床磁黄铁矿和黄铜矿 Re-Os 同位素等时线年龄

Fig. 3 Re-Os isochron age of pyrrhotite and chalcopyrite from the Lawu copper polymetallic deposit, Damxung, Tibet

构造特点,总体上仍呈现出层状、似层状产出特征(图版 -b、c)。矿体顶、底板围岩蚀变不对称,常见为底板围岩蚀变强于顶板围岩。非对称围岩蚀变是喷流-沉积矿床热液活动的重要标志。经矿床解剖研究,拉屋矿区不仅存在多次的同沉积断层(图版 -d)、滑塌角砾(图版 -e、f)、滑塌褶皱、同沉积构造、沉积间断面等(图版 -g、h),同时还存在后期构造运动而"复活"的同生断裂。这些同沉积构造制约着断陷盆地的形成演化,致使晚古生代海盆呈阶地状断陷展布,并呈现受断裂控制的深海裂谷或海槽。综合矿床的野外特征与本文测试的年龄数据可以认为,拉屋矿区在晚石炭世来姑期有一期喷流沉积,该沉积是其主要的成矿作用。

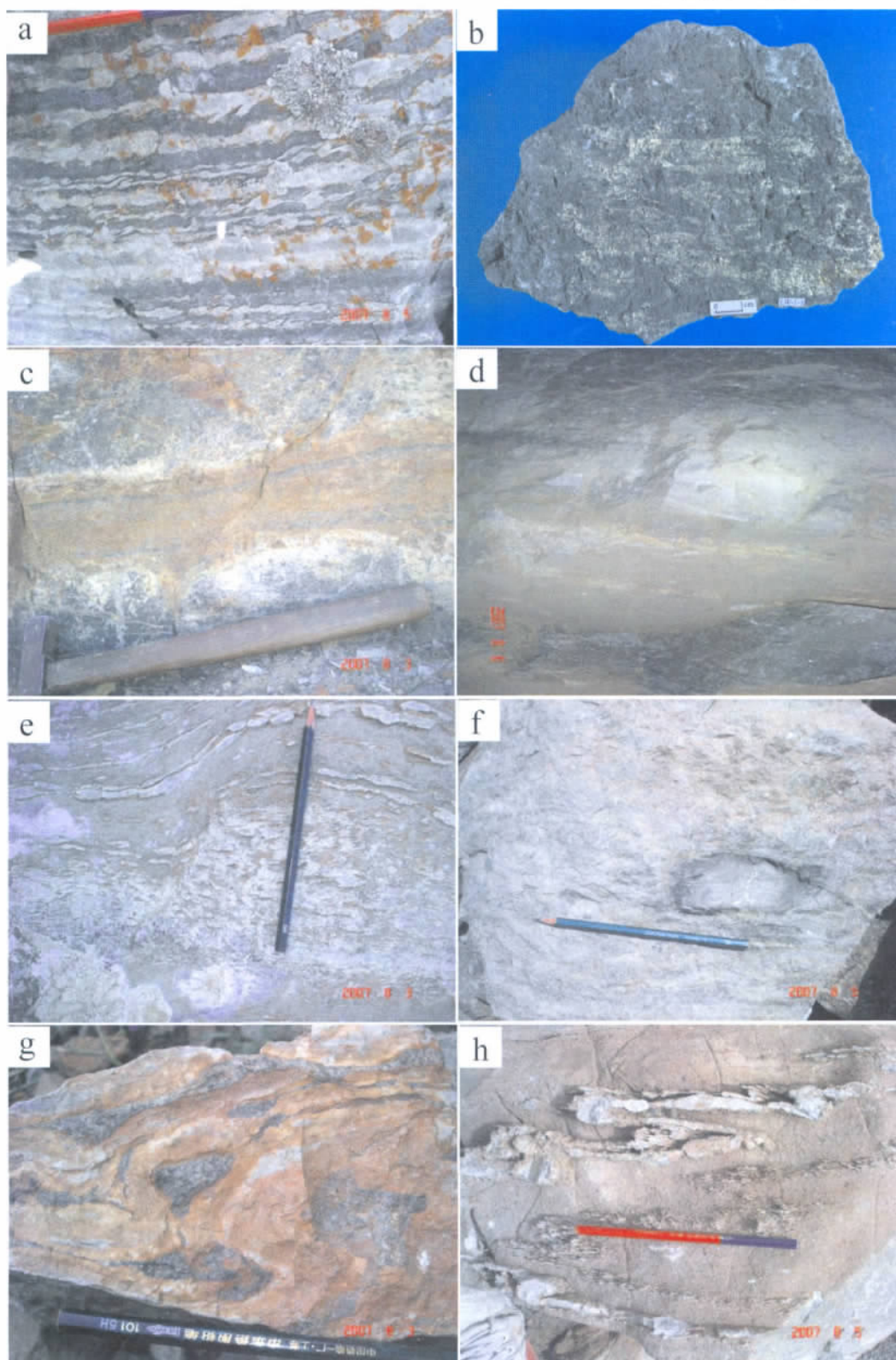
与拉屋矿床同处冈底斯成矿区并且地层为石炭系-二叠系来姑组的还有多个大型矿床,例如蒙亚啊大型铅锌矿床、沙让钼矿床、亚贵拉大型铅锌矿床和洞中拉铅锌矿床,说明来姑组对矿床的控制作用普遍^①。目前已经获取了大量的成岩成矿年龄,例如魏博等^[20]测得蒙亚啊铅锌矿床花岗岩斑岩锆石的 U-Pb 年龄为 $14.3\text{Ma} \pm 0.3\text{Ma}$,据此认为蒙亚啊铅锌矿床应为与中新世岩浆活动有关的斑岩-矽卡岩复合型矿床;索克章等^[21]测得的沙让斑岩钼矿含矿斑岩

表 2 拉屋矿床磁黄铁矿 Re-Os 同位素数据
Table 2 Re-Os dating data of the Pyrrhotite from the Lawu ore deposit

样品编号	原样名	矿物种类	样重/g	Re/ng·g ⁻¹ 测定值	普 Os/ng·g ⁻¹ 测定值	¹⁸⁷ Os/ng·g ⁻¹ 测定值	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os 测定值	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os 测定值	γ _{Os}	Re/Os	资料来源
090225-8	LW-2-14(1)	磁黄铁矿	0.101	0.9295 (1)	0.0265 (4)	0.005 (6)	169.2 (8)	1.435(74)	349.59	35.08	本文
090303-13	LW-2-7	磁黄铁矿	0.996	0.1046 (6)	0.0013 (1)	0.0004 (0)	388.9 (3)	2.536(8)	323.25	80.46	
090513-12	LW-2-2(1)	磁黄铁矿	0.964	0.1335 (1)	0.0021 (0)	0.0006 (0)	301.6 (7)	2.065(52)	306.90	63.57	
090513-13	LW-2-2(2)	磁黄铁矿	1.116	0.0536 (3)	0.0016 (0)	0.0003 (0)	157.4 (9)	1.322(3)	307.90	33.50	
060830-1	CS17	磁黄铁矿	2.6206 (495)	0.08213 (60)	0.008 (0)	0.008 (0)	390 (10)	1.926(57)	[17]		
060830-2	CS19	磁黄铁矿	0.8870 (59)	0.01109 (60)	0.002 (0)	0.002 (0)	167 (9)	1.349(158)			
060830-4	CS26	磁黄铁矿	0.3232 (65)	0.00577 (32)	0.0013 (1)	0.0013 (1)	267.9 (16.0)	1.671(198)			
060830-5	CS33	磁黄铁矿	0.4238 (67)	0.00325 (44)	0.0011 (1)	0.0011 (1)	624.2 (84)	2.522(448)			
060830-6	CS48	磁黄铁矿	0.2441 (45)	0.00364 (25)	0.0009 (1)	0.0009 (1)	320.9 (23.0)	1.949(219)			
060830-7	CS48	磁黄铁矿	0.5293 (73)	0.00971 (51)	0.0016 (1)	0.0016 (1)	260.8 (14.2)	1.266(130)			
060830-8	CS49	磁黄铁矿	0.6491 (88)	0.00678 (50)	0.0018 (2)	0.0018 (2)	458.0 (34.0)	1.987(235)			
060911-1	CS17	磁黄铁矿	2.6065 (244)	0.03408 (31)	0.00852 (8)	0.00852 (8)	365.7 (4.7)	1.903(15)			
060911-2	CS19	磁黄铁矿	0.4126 (44)	0.01184 (18)	0.00220 (5)	0.00220 (5)	166.7 (3.1)	1.413(36)			
060911-4	CS26	磁黄铁矿	0.3386 (29)	0.00657 (12)	0.00158 (5)	0.00158 (5)	246.5 (5.1)	1.833(61)			
060911-5	CS33	磁黄铁矿	0.4083 (37)	0.00403 (7)	0.00112 (3)	0.00112 (3)	485.1 (10.0)	2.112(58)			
060911-6	CS48	磁黄铁矿	0.2477 (24)	0.0042 (6)	0.00098 (3)	0.00098 (3)	282.2 (5.0)	1.776(52)			
060911-7	CS48	磁黄铁矿	0.3229 (37)	0.01066 (11)	0.00170 (3)	0.00170 (3)	144.8 (2.2)	1.215(23)			
060911-8	CS49	磁黄铁矿	0.6250 (78)	0.00940 (15)	0.00205 (4)	0.00205 (4)	318.1 (6.5)	1.660(39)			

注:①样品由国家地质实验测试中心 Re-Os 实验室测试;②括号内的数字为误差(2σ),包括质谱测定误差和稀释剂标定误差,与最后一位数字或小数点最后一位数字对齐,普 Os 是按 Nier 值的 Os 同位素丰度,通过 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 测量比计算得出的;③Re/Os 中的 Os 为普通 Os;④ $\gamma_{\text{Os}}=100[(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}}/(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{地球岩石 (t)}}-1]$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 地球岩石 (t) = $0.09531+0.40186 \cdot (e^{\lambda t}-e^{\lambda})=0.12494$, 式中 t 为 309Ma, T 为地球形成年龄 $4.558 \times 10^9 \text{a}^{[20]}$, 使用的 ^{87}Re 衰变常数 $\lambda=1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1[20]}$

图版 I Plate I



a—拉屋矿区硅质岩硅质条带构造;b—纹层状的铜矿石;c—拉屋矿区热水交代岩,砂卡岩顺层矿化,上层和下层依次为硅质岩、大理岩;d—拉屋矿区Ⅱ矿体呈层状分布,顶板与一层厚 15cm 的硅质岩接触,矿体与围岩呈渐变过渡关系;e—拉屋矿区同沉积断层;f—拉屋矿区滑塌角砾;g—大理岩中发育的同生滑塌角砾及角砾;h—拉屋矿区由硅质岩组成的同生滑塌褶皱

表 3 本次试验全流程空白水平和标准物质测定值

Table 3 The total procedure blanks and determination of reference material in this study								
样名	编号	原样名	Re/ng		普 Os/ng		¹⁸⁷ Os/ng	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
全流程空白水平	090303-16	BK	0.0028	0.0006	0.0037	0.0007	0.0005	0.000
全流程空白水平	090415-16	BK	0.0015	0.0001	0.0008	0.0000	0.0001	0.000
标准物质测定值	090303-14	JCBY	37.81	0.329	16.05	0.16	0.3340	0.0030
标准物质测定值	090513-19	JCBY	37.62	0.402	16.06	0.19	0.3391	0.0040
推荐值		JCBY	38.61	0.54	16.23	0.17	0.3363	0.0029

锆石的 U-Pb 年龄为 53Ma±1Ma,唐菊兴等^[22]对沙让斑岩钼矿进行 Re-Os 等时线定年,测得的结果为 51Ma±1.0Ma,证实沙让矿床为冈底斯主碰撞期形成的斑岩型钼矿床;高一鸣等^[23]对亚贵拉铅锌矿床石英斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为(127.8±1.1)~(129.3±1.3)Ma,并认为亚贵拉铅锌、钼矿床属于矽卡岩型-热液脉型铅锌铜银多金属-斑岩型钼矿,而非喷流沉积成因的矿床;费光春等^[24]对洞中拉铅锌矿床花岗斑岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年,测得的结果为 124.4Ma±1.9Ma,并认为洞中拉铅锌矿床与念青唐古拉地区早白垩世岩浆侵位活动有关。

西藏冈底斯成矿区近些年发现了许多矿床并进行过深入的研究,大量的成矿年龄(表 4)表明,冈底斯成矿区的成矿时代主要有 2 个阶段:50~40Ma 和 20~10Ma,其中前者代表了印度与亚洲大陆同碰撞阶段的成矿作用,而后者代表其后碰撞成矿作用^[42]。然而唐菊兴等^[41]在雄村测得的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 169.5~176.8Ma,显示成矿年龄为燕山期。本次研究测得的拉屋矿区成矿年龄(309±31)Ma,为冈底斯成矿带上最老的成矿年龄,表明冈底斯成矿区在来姑组沉积时期存在一期晚石炭世喷流-热水沉积作用,因此应该对区域上存在有来姑组的矿区注意寻找喷流-沉积型矽卡岩矿床。

表 4 西藏冈底斯成矿带成矿年代对比

Table 4 The correlation of ore-forming age between Gandise ore belt				
序号	矿床	年龄/Ma	测试对象/测试方法	资料来源
1	驱龙斑岩铜矿 [*]	15.99±0.32	辉钼矿/Re-Os 等时线	[25]
2	驱龙斑岩铜矿 [*]	15.82~16.85	辉钼矿/Re-Os 模式年龄	[26]
3	驱龙斑岩铜矿 [*]	16.41±0.48	辉钼矿/Re-Os 等时线	[27]
4	驱龙斑岩铜矿 [*]	15.99±0.35	辉钼矿/Re-Os 等时线	[28]
5	南木斑岩铜矿 [*]	14.67±0.2	辉钼矿/Re-Os 等时线	[29]
6	冲江斑岩铜矿 [*]	14.04±0.16	辉钼矿/Re-Os 等时线	[30]
7	冲江斑岩铜矿 [*]	14.85±0.69	辉钼矿/Re-Os 等时线	[28]
8	拉抗俄斑岩铜矿 [*]	13.5~13.6	辉钼矿/Re-Os 模式年龄	[30]
9	帮浦斑岩铜矿 [*]	15.32±0.79	辉钼矿/Re-Os 等时线	[31]
10	甲马矽卡岩型铜矿 [*]	15.18±0.79	辉钼矿/Re-Os 等时线	[32]
11	甲马矽卡岩型铜矿 [*]	15.41±0.69	辉钼矿/Re-Os 等时线	[33]
12	甲马矽卡岩型铜矿 [*]	14.2~17.5	辉钼矿/Re-Os 模式年龄	[34]
13	甲马矽卡岩型铜矿 [*]	15.22±0.59	辉钼矿/Re-Os 等时线	[34]
14	知不拉矽卡岩型铜矿 [*]	16.9±0.64	辉钼矿/Re-Os 等时线	[32]
15	冲木达矽卡岩型铜金矿 [*]	40.3±5.6	辉钼矿/Re-Os 等时线	[35]
16	明则隐伏斑岩型钼矿床	30.26±0.69	辉钼矿/Re-Os 等时线	[36]
17	怒日层矽卡岩型钨铜钼矿 [*]	23.62±0.97	辉钼矿/Re-Os 等时线	[36]
18	甲岗雪山钨钼钽多金属矿 [*]	21.37±1.35	辉钼矿/Re-Os 等时线	[37]
19	吉如斑岩铜矿 [*]	48.3~50.8	辉钼矿/Re-Os 模式年龄	[38]
20	达布斑岩铜矿 [*]	14.53±0.8	辉钼矿/Re-Os 等时线	[39]
21	吹败子斑岩铜矿 [*]	20.70±0.59	辉钼矿/Re-Os 等时线	[39]
22	舍索矽卡岩型同多金属矿 [*]	116.2±1.9	辉钼矿/Re-Os 等时线	[40]
23	雄村铜金矿 [*]	169.5~176.8	辉钼矿/Re-Os 模式年龄	[41]
24	沙让斑岩钼矿 [*]	51.57~52.69	辉钼矿/Re-Os 模式年龄	[22]
25	沙让斑岩钼矿 [*]	51±1.0	辉钼矿/Re-Os 等时线	[22]
26	拉屋铜多金属矿 [*]	309±31	辉钼矿/Re-Os 等时线	本文

3.3 成矿物质来源

Re-Os 同位素体系是硫化物矿形成的强有力

的示踪剂和成矿过程中地壳物质混入程度高度灵敏的指示剂^[43]。由于地壳相对富集 Re,混入地壳物质越多产生放射性 ^{187}Os 的含量就越高,相应的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值也发生变化。 γ_{Os} 是指示地壳物质加入成矿体系的一个重要参数^[44-45],表示样品 Os 同位素组成在某一特定时间 t 相对当时球粒陨石平均值的 Os 同位素组成差异。

拉屋矿区磁黄铁矿矿石 Re 和 Os 的含量较低,其 Re、Os 比值为 20.46~80.46,明显高于东格陵兰古近纪地幔柱环境喷发的苦橄岩的 Re/Os 比值 0.02~0.21^[46],这可能反映了该矿区矿石中有一定地壳物质的参与。拉屋矿床硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 0.51 ± 0.12 ,高于太古宙末混染科马提岩有关铜镍硫化物矿石的 $^{87}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值 0.10889 ± 0.0053 ^[46],但明显低于澳大利亚 Deborah 中成中温脉状金矿石的初始值 1.04 ± 0.16 ^[47]。拉屋矿区硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 介于 1.322~2.536 之间,高于各类地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值(0.105~0.152)^[48-51],但远远低于平均大陆地壳值 3.63^[52],反映成矿物质来源具有壳幔混合的特征。

γ_{Os} 计算公式为: $\gamma_{\text{Os}(t)} = 100[(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}(t)} / (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}(t)} - 1]$,其中球粒陨石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的计算公式为: $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}(t) = (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i + (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os})(e^{\lambda T} - e^{\lambda t})$,式中 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$ 为 0.09531, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 为 0.40186, T 为地球形成年龄 $4.558 \times 10^9 \text{a}$ ^[47]。使用的衰变常数 ^{187}Re 为 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ ^[9],代入 309Ma 获得球粒陨石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}(t)$ 为 0.124940187。结合样品中 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 测试值,计算出的 γ_{Os} 列于表 2。由于地壳 Re/Os 比值高,因此地壳组分加入岩浆体系越多, γ_{Os} 表现为大正值,而 Re 的亏损导致 γ_{Os} 为负值。从表 2 可以看出, γ_{Os} 的变化范围为 306.90~880.29,平均值为 433.58,高于芬兰 Keivinsta 矿床的 γ_{Os} 值(+130~+170,壳源 Os>80%),低于澳大利亚东 Kimberley 的 Sally Malay 矿床(+950~+1300,壳源 Os>70%)。通过对比发现,拉屋矿区样品的 Os 可能是壳幔混合来源的,其中壳源 Os>28%~<70%。从普 Os 对 Re/Os 比值的图解(图 4)中可以看出,拉屋矿区的投影点落于下地壳与地幔熔体之间及其附近,同样也反映出该矿区的成矿物质为壳幔混合来源。

根据已测得的拉屋矿床的稳定同位素数据^[1,3,53],硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-4‰~10.11‰,其中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 10.11‰;闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-2.4‰~-0.42‰,平均为-1.14‰;磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-1.1‰~-0.1‰,

平均为-0.6‰;黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-0.67‰~1.65‰,平均为 0.26‰;方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-4‰~3.48‰,平均为 0.12‰。 $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} < \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,说明拉屋矿床的 S 同位素组成是在非平衡条件下形成的,并且 $\delta^{34}\text{S}$ 的值超过 10‰,显示出该矿体的硫源不均一,可能为低值的深源岩浆硫与高值的海水硫的混合^[54]。其成矿流体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 的值为-8.6‰~-3.9‰^[53],平均值为-5.7‰,与地幔射气和岩浆来源的 C 同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围-5‰~-2‰和-9‰~-3‰^[55])非常相似,表明成矿流体来源于地幔或下地壳的深源岩浆。

综上所述,拉屋矿床成矿物质应该来源于地幔,并在喷流过程中与海水汇合,同时遭受了大量壳源物质的混染,最终形成喷流-沉积型矽卡岩矿床。

4 结 论

(1)拉屋铜铅锌多金属矿床的磁黄铁矿 Re-Os 同位素测年结果为 $309\text{Ma} \pm 31\text{Ma}$,表明拉屋矿区晚石炭世来姑期应该有一次火山喷流-热水沉积时期,形成了矿床的主体。在区域上应注意寻找来姑期喷流-沉积型矽卡岩矿床。

(2)拉屋矿床成矿物质应该来源于地幔,并在喷流过程中与地壳海底的海水汇合,同时遭受了大量壳源物质的混染,最终在海底成矿。

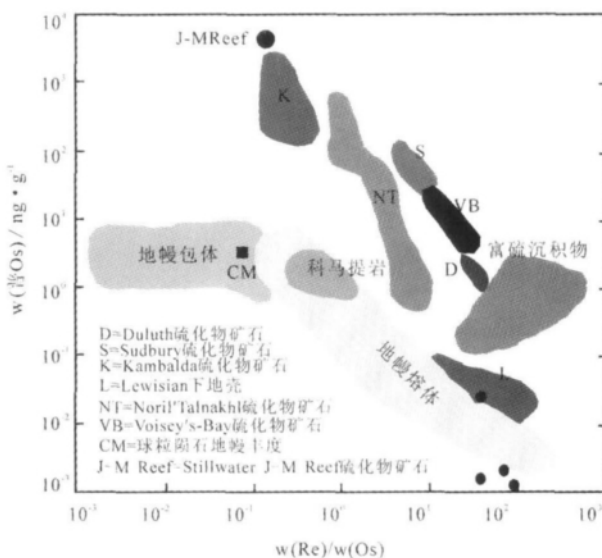


图 4 拉屋矿区硫化物中 Os 对 Re/Os 含量关系图
(底图据参考文献[14])

Fig. 4 Diagram of common Os versus Re/Os for sulfides
from the Lawu ore district, Tibet

致谢：文中所测试的样品由廊坊科大矿物分选科技有限公司挑选。野外工作期间得到中国地质科学院矿产资源研究所曲晓明研究员、辛洪波副研究员、西藏地质调查院刘鸿飞院长、河南省地质调查院杨长青高级工程师、拉屋铜多金属矿王志平矿长等的支持。样品测试过程中得到李超同志的帮助。在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]杜欣,刘俊涛,王亚平,等.西藏拉屋铜铅锌多金属矿床地质特征及成因分析[J].矿产与地质,2004,18(5):410-414.
- [2]何国朝,赵延朋,原恩慧,等.西藏拉屋铜铅矿床成因探讨[J].矿产与地质,2009,23(2):147-151.
- [3]连永牢,曹新志,燕长海,等.西藏当雄县拉屋铜铅锌多金属矿床喷流沉积成因[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(5):1041-1047.
- [4]刘延勇.西藏拉屋多金属矿床的成矿元素分带规律[J].中山大学学报(自然科学版),2008,47(6):66-69.
- [5]Du Andao,Wu Shuqi,Sun Dezhong,et al.Preparation and certification of Re-Os dating reference materials:Molybdenite HLP and JDC[J].Geostandard and Geoanalytical Research, 2004,28(1):41-52.
- [6]杜安道,何红蓼,殷宁万,等.辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J].地质学报,2001,68(4):339-347.
- [7]杜安道,赵敦敏,王淑贤,等.Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[J].岩矿测试,2001,20(4):247-252.
- [8]屈文俊,杜安道.高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J].岩矿测试,2003,22(4):254-257.
- [9]Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group A, A, A and B iron meteorites[J]. Science, 1996, 271(5252):1099-1102.
- [10]Ludwig K R. Users manual for isoplot/Ex: A geochronological toolkit for microsoft excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2000:53.
- [11]Ruiz J, Mathur R. Metallogenesis in continental margins:Re-Os evidence from porphyry copper deposits in Chile (in Application of radiogenic isotopes to ore deposit research and exploration)[J]. Re-views in Economic Geology,1999,12:59-72.
- [12]蒋少涌,杨静红,赵葵东,等.金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J].南京大学学报(自然科学版),2000,36(6):669-677.
- [13]Lambert D D,Foster J G,Frick L R,et al.Re-Os isotopic systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system,Labrador, Canada[J].Lithos,1999,47:69-88.
- [14]Morgan J W,Stein H J,Hannah J L,et al.Re-Os study of Fe-Ti-V oxide and Fe-Cu-Ni sulfide deposits,Suwalki Anorthosite Massif, northeast Poland[J]. Mineralium Deposita, 2000,35:391-401.
- [15]Freydier C,Ruiz J,Chesley J,et al.Re-Os isotope systematics of sulfides from felsic igneous rocks:Application to base metal porphyry mineralization in Chile[J]. Geology,1977,25:775-778.
- [16]Stein H J, Morgan J W, Schersten A, et al. Re-Os Dating of Low-Level Highly Radiogenic(LLHR)Sulfides:The Harnas Gold Deposit, Southwest Sweden,Records Continental-Scale Tectonic Events[J]. Economic Geology,2000,95:1657-1671.
- [17]Wang Jian-Zhong,Li Jian-Wei,Zhao Xin-Fu,et al.Re-Os Dating of Pyrrhotite from the Chaoshan Gold Skarn,Eastern Yangtze Craton,Eastern China[J]. International Geology Review, 2008, 50(4):392-406.
- [18]张作衡,柴凤梅,杜安道,等.新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪[J].岩石矿物学杂志,2005,24(4):285-293.
- [19]丰成友,张德全,屈文俊,等.青海格尔木骆驼沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年[J].地质学报,2006,80(4):571-576.
- [20]魏博,程顺波,庞迎春,等.西藏蒙亚啊铅锌矿床成矿年龄及其地质意义[J].华南地质与矿产,2010,(1):14-19.
- [21]秦克章,李光明,赵俊兴,等.西藏首例独立钼矿——冈底斯沙让大型斑岩钼矿的发现及意义[J].中国地质,2008,35(6):1101-1112.
- [22]唐菊兴,陈毓川,王登红,等.西藏工布江达县沙让斑岩钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及其地质意义[J].地质学报,2009,83(5):698-704.
- [23]高一鸣,陈毓川,唐菊兴,等.西藏工布江达县亚贵拉铅锌钼多金属矿床石英岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J].地质学报,2009,83(10):1436-1444.
- [24]费光春,温春齐,王成松,等.西藏墨竹工卡县洞中拉铅锌矿床花岗岩斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J].中国地质,2010,37(2):470-476.
- [25]李光明,芮宗瑶.西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄[J].大地构造与成矿学,2004,28(2):165-170.
- [26]王亮亮,莫宣学,李冰,等.西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学[J].岩石学报,2006,22(4):1001-1008.
- [27]孟祥金,侯增谦,高永丰,等.西藏冈底斯成矿带驱龙铜矿 Re-Os 年龄及成矿学意义[J].地质论评,2003,49(6):660-666.
- [28]芮宗瑶,侯增谦,曲晓明,等.冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升[J].矿床地质,2003,22(3):217-225.
- [29]曲晓明,侯增谦,黄卫.冈底斯斑岩铜矿(化)带:西藏第二条“玉龙铜矿带?”[J].矿床地质,2001,20(4):355-366.
- [30]侯增谦,曲晓明,王淑贤,等.西藏冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄:成矿作用时限与动力学背景应用[J].中国科学(D 辑),2003,33(7):609-618.
- [31]孟祥金,侯增谦,高永丰,等.西藏冈底斯东段斑岩铜钼铅锌成矿系统的发育时限:帮浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄证据[J].矿床地质,2003,22(3):246-252.
- [32]李光明,芮宗瑶,王高明,等.西藏冈底斯成矿带甲马和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[J].矿床地质,2005,28(2):481-489.
- [33]李胜荣,袁万明,屈文俊,等.西藏墨竹工卡县甲马多金属矿床几组年龄数据的比较与成因研究[J].岩石学报,2008,24(3):511-518.
- [34]应立娟,王登红,唐菊兴,等.西藏甲玛铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J].地质学报,2010,84(8):1165-1174.
- [35]李光明,刘波,余宏全,等.西藏冈底斯成矿带南缘喜马拉雅早期成

- 矿作用——来自冲木达铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄证据[J]. 地质通报, 2006, 25(12): 1481-1486.
- [36] 闫学义, 黄树峰, 杜安道. 冈底斯泽当大型钨铜钼矿 Re-Os 年龄及陆缘走滑转换成矿作用[J]. 地质学报, 2010, 3(84): 398-406.
- [37] 王治华, 王科强, 喻万强, 等. 西藏申扎县甲岗雪山钨钼(秘)多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 安徽地质, 2006, 16(2): 112-119.
- [38] 张刚阳, 郑有业, 龚福志, 等. 西藏吉如斑岩铜矿: 与陆陆碰撞过程相关的斑岩成岩成矿时代约束[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 473-479.
- [39] 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 等. 西藏斑岩铜矿对重大地质时间的响应[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 145-152.
- [40] 赵元艺, 宋亮, 樊兴涛, 等. 西藏申扎县舍索铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1150-1158.
- [41] 唐菊兴, 黎风信, 李志军, 等. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成年限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据[J]. 矿床地质, 2010, 29(3): 461-475.
- [42] 罗兆华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 碰撞造山带斑岩铜矿床的深部约束机制[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 447-456.
- [43] Foster G, Lambert D D, Freck L R, et al. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites[J]. Nature, 1996, 382: 703-706.
- [44] Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1989, 53: 1583-1595.
- [45] Walker R J, Morgan J W, Horan M F, et al. Re-Os isotopic evidence for an enriched_mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58: 4179-4197.
- [46] Brooks C K, Keays R R, Lambert D D, et al. Re-Os isotope geochemistry of Tertiary picritic and basaltic magmatism of East Greenland: constraints on plume-lithosphere interactions and the genesis of the Platinova reef, Skaergaard intrusion[J]. Lithos, 1999, 47: 107-126.
- [47] Arne D C, Bierlein F P, Morgan J W, et al. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia[J]. Economic Geology, 2001, 96(6): 1455-1459.
- [48] Shirey S B, Walker R J. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 1998, 26: 423-500.
- [49] Meisel T, Waker R J, Morgan J W. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle[J]. Nature, 1996, 383: 517-520.
- [50] Snow J E, Reisberg L. Os isotopic systematics of the MORB mantle: results from altered abyssal peridotites[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1995, 133: 411-421.
- [51] Widom E, Shirey S B. Os isotope systematics in the Azores: Implications for mantle plume sources[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1996, 142: 451-465.
- [52] Palmer M R, Turekian K K. $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ in marine manganese nodules and the constraints on the crustal geochemistry of rhenium and osmium[J]. Nature, 1986, 319: 216-220.
- [53] 崔玉斌, 赵元艺, 吕立娜, 等. 西藏拉屋砂卡岩型铜铅锌多金属矿床碳、氢、氧、硫同位素特征及意义[J]. 矿床地质, 2010, (29) (增刊, 第10届全国矿床会议论文): 423-424.
- [54] 徐文忻, 李衡, 张永忠, 等. 海底热水沉积矿床硫同位素证据() [J]. 矿物学报, 2009, (增刊): 333-334.
- [55] Taylor B E. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S—reviews in mineralogy[C]//Stable isotopes in high temperature geological process. Mineralogical Society of America, 1986, (16): 185-226.
- ① 河南省地质调查院. 西藏班公湖-怒江成矿带铜铅锌多金属矿床调查研究报告. 2011.