

西昆仑阿巴列克铜铅矿床黄铜矿 Re-Os 定年及地质意义*

张正伟¹ 漆亮¹ 沈能平¹ 游富华^{1,2} 张中山^{1,2} 周灵洁^{1,2}

ZHANG ZhengWei¹, QI Liang¹, SHEN NengPing¹, YOU FuHua^{1,2}, ZHANG ZhongShan^{1,2} and ZHOU LingJie^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2010-03-21 收稿, 2010-09-08 改回.

Zhang ZW, Qi L, Shen NP, You FH, Zhang ZS and Zhou LJ. 2011. Re-Os isotopic dating of chalcopyrite from the Abalieke copper-lead deposits in West Kunlun, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3123-3128

Abstract It is a very important and effective method of analyzing the ore-forming processes by taking advantage of geochemistry analytical approaches as well as traditional ways, such as testing the Re-Os, discriminating the paragenetic association of the minerals and the tectonic settings. Seven chalcopyrite and one pyrite samples from the main orebody of Abalieke Cu-Pb deposit are used for Re-Os dating. The chalcopyrite is associated with galenite and dolomite which contain $626 \times 10^{-9} \sim 14533 \times 10^{-9}$ of Re and $0.026 \times 10^{-9} \sim 0.36 \times 10^{-9}$ of Os respectively, and yield a Hercynina isochron age of 331.3 ± 5.2 Ma. High Re/Os ratio, low Os concentration and highly radiogenic Os isotopic ratios of these samples suggest that they are of crustal origin. The tectonic evolving shows that the southwestern margin of the Tarim block was a passive continental margin in the Late Paleozoic era. Because of the Paleo-Tethys ocean movement during Carboniferous, the depression basin are formed in margin of Tarim craton, comprised lead-zinc deposits in clastic rock-carbonate host stratum that cover up the Devonian. This Re-Os isotopic dating age of chalcopyrite is nearly closed with ore-hosted stratum. Our Re-Os result provides new evidences, showing that Abalieke Cu-Pb deposit experienced the syngenetic ore-forming process in Hercynina. Also this study gives important geochemical evidence on such issues: the lead-zinc deposits are mainly sedimentary formation-controlled type; the ore-forming elements mainly came from stratum; mineralization occurred in the joint position between Upper Devonian and Lower Carboniferous, while the rock in which mainly consist of sandstone and carbonatite formation. It can be seen that the metallogenic system of the copper-lead-zinc strata-bound deposits in carbonate rock has a certain complexity and provides wider space for further researches.

Key words Chalcopyrite; Re-Os isotopic dating; Copper-lead deposits; West Kunlun area

摘要 除了传统的测试 Rb-Sr、Sm-Nd、U-Th-Pb、K-Ar 或 Ar-Ar 等方法来讨论碳酸盐岩层控型铅锌矿的成矿年龄外, 利用硫化物矿物 Re-Os 分析成矿过程, 在矿床成矿系统上也是十分重要而有效的工具。从新疆西昆仑阿巴列克铜铅矿床的主矿体中, 选取 7 个黄铜矿和 1 件黄铁矿样品, 对其进行了 Re-Os 定年, 结果表明它们分别含有 $626 \times 10^{-9} \sim 14533 \times 10^{-9}$ Re 和 $0.026 \times 10^{-9} \sim 0.36 \times 10^{-9}$ Os, 给出海西期的 331.3 ± 5.2 Ma 等时线年龄。样品的高 Re/Os 比值、低含量普通 Os 和高放射成因 Os 的组成特性支持这组黄铜矿样品为表壳构造成因。构造演化历史表明, 塔里木地块西南缘在晚古生代属于被动大陆边缘。赋矿地层霍什拉甫组属于台地相碳酸盐岩-碎屑岩建造, 地层时代与上述等时年龄几乎相近。本次工作提供了一个新的证据, 支持阿巴列克矿床在海西期经历了同生成矿作用, 矿床类型主要为沉积层控型, 成矿物质主要来源于地层, 矿化发生在上泥盆统与下石炭统的结合部位, 岩性以砂岩与碳酸盐岩组合为主, 具有特定的层位控制特点。从中可以看出, 碳酸盐岩层

* 本文受国家自然科学基金项目(41073042)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX2-YW-107-6)和中国科学院“百人计划”项目(KZCX2-YW-BR-09)联合资助。

第一作者简介: 张正伟, 男, 1959 年生, 博士, 研究员, 从事矿床地球化学研究, E-mail: zhangzhengw@hotmail.com

控型铅锌铜矿床成因具有一定的复杂性,具有深入研究的广阔空间。

关键词 黄铜矿; Re-Os 同位素; 铜铅矿床; 西昆仑

中图法分类号 P597.3

1 引言

在西昆仑地区,除了少数铅锌矿床产于西昆仑中带和北带之外,主要分布于塔里木地台南缘,以晚古生代的碎屑岩-碳酸盐岩容矿的层控型矿床为特征,以铁克里克、塔木、阿巴列克、卡兰古等铅锌矿床为代表。在20世纪50年代,新疆冶金702地质大队对其进行过初步勘探,认为矿床属岩浆期后热液型;进入21世纪,新的研究成果展示了多种成因观点,多数研究认为是密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床(匡文龙等,2002,2005;王书来等,2001;祝新友等,1998;常雪生,2003),也有人认为是海底热卤水喷流成矿(SEDEX)(胡庆雯等,2007)和受地层与构造联合控制的中低温热液脉状铅锌矿床(袁波,2007),最近认为用沉积改造的观点解释比较切合找矿实际需要(张正伟等,2009)。这些矿床成因认识的不同是显而易见的,并且由于这些矿床矿石矿物组合的简单性,很难找到合适的矿物进行同位素定年。因此,到目前为止尚无可靠的同位素年龄数据发表。阿巴列克铜-铅矿床位于东经 $76^{\circ}22'$,北纬 $38^{\circ}10'$,产于霍什拉甫组(C_1h)下部碎屑岩与上部碳酸盐岩接触部位(图1),按1:25万区调报告(河南省地质调查院,2006^①)解释为海西期成矿。本次黄铜矿 Re-Os 同位素研究是为确定硫化物阶段的年龄及源区性质。

2 地质背景及矿床特征

研究区大地构造位于塔里木地台南缘铁克里克断隆中段晚古生代浅海相台地(成守德和徐新,2001;王元龙和成守德,2001)。基底主要出露长城系赛图拉群(ChST)和蓟县系桑株塔格群(JxS)。古生代以后的地质建造演化表现为:由于原特提斯洋(潘裕生,1990)封闭,使昆仑地体拼贴于塔里木地台南缘,并沉积了一套泥盆系陆相碎屑岩,出露阿克巴西麻扎尔组(D_2a)、克孜勒陶组(D_2kz)和奇自拉夫组(D_3q)。到石炭纪,中昆仑以南的古特提斯洋(潘裕生,1990)的活动,致使塔里木南西边缘形成了克拉通边缘拗陷盆地沉积,形成了台地边缘相沉积碎屑岩-碳酸盐,上覆于泥盆系之上,其中克里塔格组(河南省地质调查院,2006)(D_3C_1kl)大致相当于先前1:20万克孜勒陶幅地质图划分的卡拉巴西塔格组(C_1kl)和克里塔格组(C_1k),为滨海相沉积环境。霍什拉甫组(C_1h)为一套含丰富化石的碳酸盐岩夹碎屑岩。中石炭统卡拉乌依组(C_2kl)和阿孜干组(C_2a)为碳酸盐岩夹碎屑岩沉积。上石炭统-下二叠统塔哈奇组

(C_2P_1th)大致相当于1:20万克孜勒陶幅地质图划分的哈奇组(C_3t)。随着古特提斯在石炭纪末向北消减,二叠纪塔里木地台南缘遭受南北向挤压,地层为下二叠统克孜里奇曼组(P_1kz)、中二叠统棋盘组(P_2q)和上二叠统达里约组(P_3d),总体呈海退系列。三叠纪时期处于隆起剥蚀状态,造成盆地构造向隆起造山之间的构造转化,地层缺失。侏罗纪在推覆体前缘下盘形成含煤盆地,后缘出现拉张性盆地(丁道桂等,1996),沉积河湖相碎屑岩。晚白垩世-始新世新特提斯洋活动,沉积泻湖相、浅海相的红色碎屑岩夹碳酸盐岩。第三系为泻湖相-浅海相的石膏岩、碳酸盐岩沉积。

阿巴列克矿区内出露的主要地层包括卡拉巴西塔格组(C_1kl)、克里塔格组(C_1k)和霍什拉甫组(C_1h),由一套砂岩、粉砂岩、灰岩和白云岩组成的碎屑岩-碳酸盐岩组合。铜铅矿体长约300m,宽5~15m,最宽处有30m,控制延深约有100m。两侧围岩为紫红色碎屑岩和灰黑色白云岩,白云岩已全部角砾岩化,呈夹层出现。矿体产于霍什拉甫组(C_1h)下部碎屑岩与上部碳酸盐岩接触部位(图1)。

矿体呈透镜状位于向斜构造扬起端的紫红色石英砂岩与上覆白云岩接触带的白云岩一侧,由于白云岩化强烈而不显层理,成角砾状构造,使矿体形态更加复杂。主要矿物为黄铜矿、方铅矿、黄铁矿,少量闪锌矿和毒砂,伴生银、钴元素。脉石矿物为白云石、石英、方解石和白云母。矿石结构多为它形片状和粒状。矿石构造为块状、浸染状和脉状,为交代和充填作用形成。围岩蚀变为白云岩化、硅化、黄铁矿化、绿泥石化。

3 样品描述

在阿巴列克矿床可以观察到:(1)黄铜矿多呈不规则状,颗粒直径0.05mm左右,与毒砂共生且共生边界平直,显示同期形成特征;(2)黄铜矿与不规则状的方铅矿共生;(3)在黄铜矿裂隙中充填黄铁矿,也有颗粒较粗的黄铁矿被黄铜矿包裹,反映多期成矿特征。本次研究的黄铜矿从2号平硐3线矿体中采集,是与方铅矿共生的黄铜矿(图2)。目的是把铜-铅成矿作用作为整体研究,代表主成矿作用时限。选择块状矿石,并且黄铜矿与方铅矿呈粒状密切共生。共选择8件样品(表1),其中黄铜矿7件,黄铁矿1件(与黄铜矿共生,分析数据与黄铜矿对比),在显微镜下挑出单矿物,使矿石成因保持一致性,可以认为这样的样品符合同位素定年的要求。

① 河南省地质调查院. 2006. 中华人民共和国地质图(1:25万,英吉沙幅). J43C00203

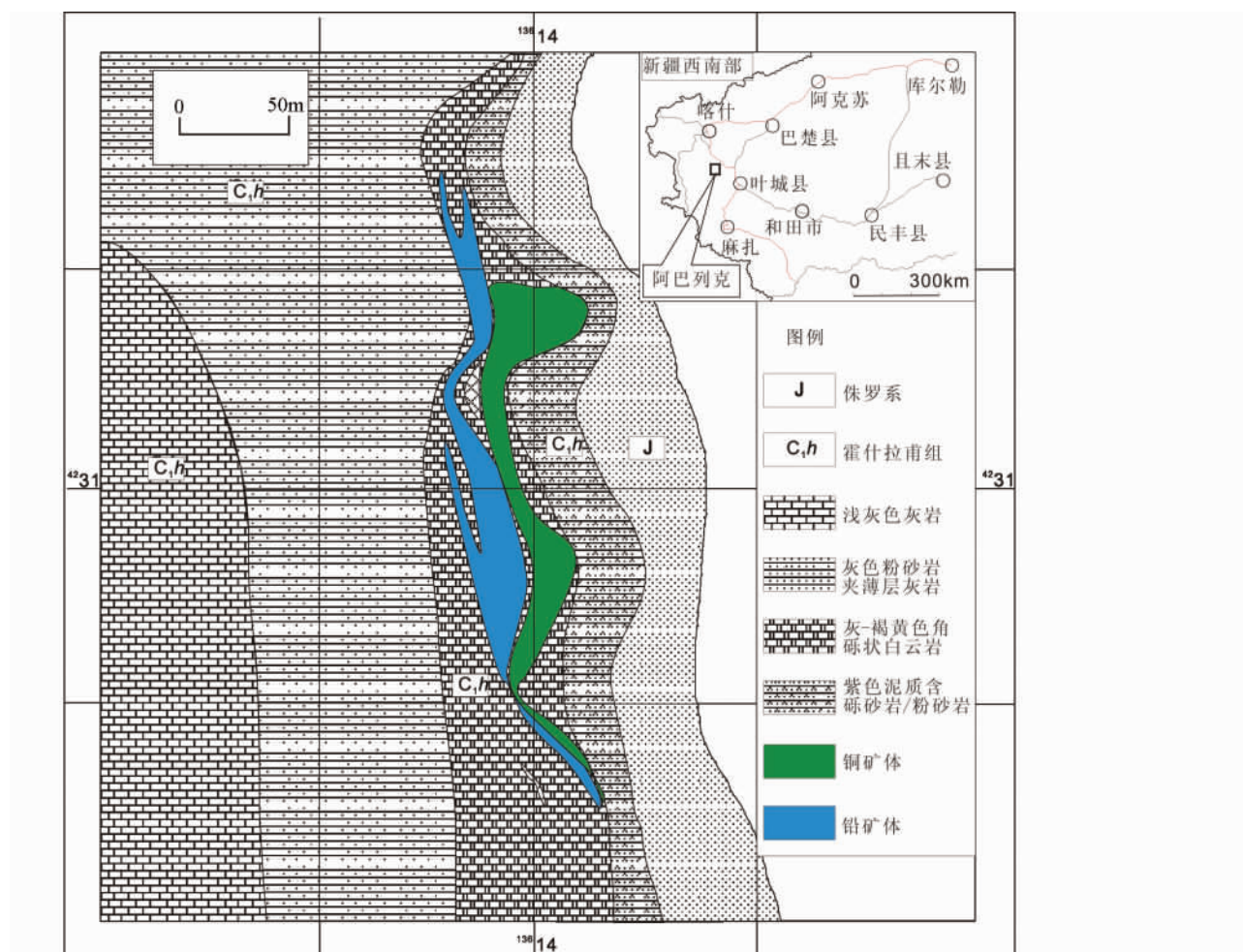


图1 阿巴列克铜铅矿床地质简图(野外草测)
Fig.1 Simple geological map of the copper-lead deposit in Abalieke

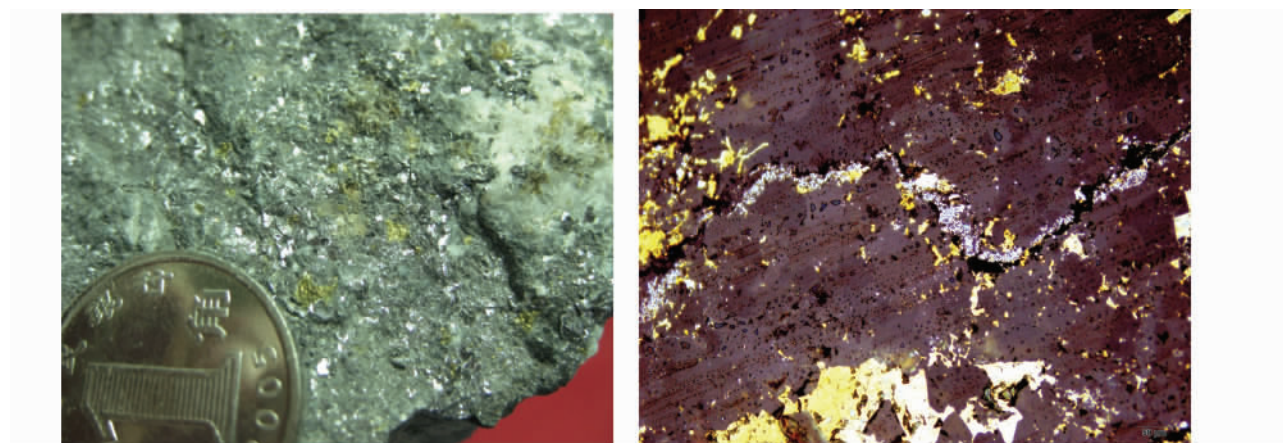


图2 阿巴列克铜铅矿床中的黄铜矿
左图为手标本 右图为光片显微照片 5×10 倍,显示方铅矿细脉,黄铜矿及少量黄铁矿
Fig.2 Photo of chalcopyrite in the Abalieke copper-lead deposit

表 1 西昆仑阿巴列克铜铅矿床黄铜矿和黄铁矿 Re, Os 组成数据

Table 1 The results of Re, Os isotopic composition of chalcopyrite and pyrite in Abalieke copper-lead deposit, West Kunlun

样品号	矿物	^{187}Re	^{187}Re	^{187}Os	^{187}Os	Re ($\times 10^{-9}$)	Re ($\times 10^{-9}$)	普通 Os ($\times 10^{-9}$)	普通 Os ($\times 10^{-9}$)	模式年龄 (Ma)	模式年龄 (Ma)
			1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ
ABLK-909	黄铜矿	1697	23	9.37	0.12	2711	37	0.36	0.02	331.59	4.13
ABLK-929	黄铁矿	392	10	2.22	0.09	626	16	0.061	0.011	340.74	13.59
ABLK-931	黄铜矿	4643	120	25.4	0.26	7417	191	0.14	0.03	328.36	3.31
ABLK-934	黄铜矿	4264	70	23.47	0.36	6811	112	0.21	0.06	330.74	5.11
ABLK-939	黄铜矿	9097	129	49.12	0.51	14533	206	0.21	0.02	324.39	3.37
ABLK-932	黄铜矿	4690	63	26.22	0.31	7492	100	0.033	0.030	335.8	5.4
ABLK-933	黄铜矿	5026	32	27.93	0.20	8029	51	0.026	0.019	333.8	2.6
ABLK-944	黄铜矿	3719	30	21.03	0.23	5941	48	0.202	0.027	339.7	3.2

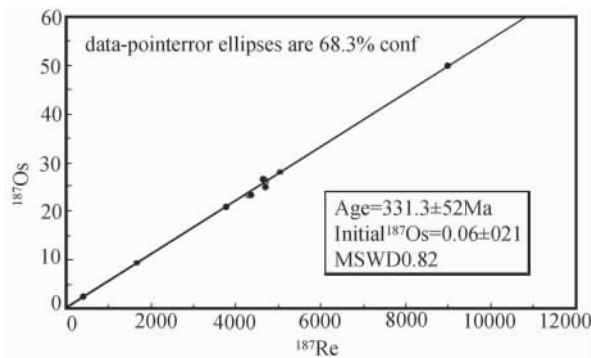


图 3 西昆仑阿巴列克铜铅矿床黄铜矿和黄铁矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 3 Re-Os isotopic dating of chalcopyrite and pyrite in copper-lead Abalieke deposit, West Kunlun

4 分析方法

Re-Os 同位素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室用 ELAN DRC-e ICP-MS 完成。实验参照 Qi *et al.* (2010) 的方法进行,分析步骤简述如下:称取 0.1g 样品于卡洛斯管中,加入 ^{185}Re 和 ^{190}Os 稀释剂,用逆王水于 200℃ 分解 12h,开管后在水浴中采用原位蒸馏方法蒸馏 Os,Os 用 3mL 水吸收;将蒸馏后的溶液在烧杯中蒸干,转化为 $2\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 介质,用阴离子交换树脂 AG 1-X8 分离 Re(Qi *et al.*, 2007, 2010),最后定容至约 3mL,ICP-MS 测定。Re 和 Os 全流程空白值分别为 0.006×10^{-9} 和 0.002×10^{-9} 。实验结果由铼钨矿标样 JDC 监控,标样测定年龄数据与推荐值基本一致。

5 分析结果

ICP-MS 测定的黄铜矿的 Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差,置信度 95%。

模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%),置信度 95%。模式年龄 t 按下式计算:

$$t = 1/\lambda [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$$

式中, λ 为 ^{187}Re 衰变常数, 1.666×10^{-11}

阿巴列克铜铅矿床中 8 个样品的分析结果汇集在表 1。表中误差全部为测量统计误差。由于该组样品 Re 含量高, Re/Os 比值大,普通 Os 含量低,普通 Os 测试误差较大,因此采用 ISOPLOT 程序(Ludwig, 1994)对 ^{187}Re 和 ^{187}Os 作等时线图,以避免普通 Os 带来的误差,得到 $331 \pm 5.2\text{Ma}$ 的年龄(图 3)。该组样品的高 Re 低 Os 含量、高 Re/Os 比值及高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值表明,样品中的 Os 是高放射成因的。

6 讨论

6.1 黄铜矿成矿时代的确定

本文测得 7 件黄铜矿和 1 件黄铁矿样品的 Re-Os 同位素的等时线年龄为 $331 \pm 5.2\text{Ma}$,与样品的模式年龄基本一致(表 1),说明测试结果可信。虽然黄铁矿的 Re-Os 含量明显低于黄铜矿,但并不影响等时线的线性关系,表明黄铁矿与黄铁矿同期成矿。该等时线年龄为阿巴列克铜铅矿床提供了一个准确的形成时限,可以代表成矿的真实年龄。矿床地质研究表明(张正伟等, 2009),阿巴列克矿区出露地层主要为下石炭统(354 ~ 320Ma),赋矿地层为下石炭统霍什拉甫组(地层年龄 $330 \pm \text{Ma}$),自下而上分为 4 个岩性段:第一岩性段为浅紫色泥质含砾砂岩、砂岩和粉砂岩;第二岩性段主要为一套碳酸盐岩建造,由黄褐色-灰黄色角砾状灰质白云岩夹少量粗砂岩和薄层状-透镜状石英细砾岩组成,顶部有 0.5m 厚的灰色石英细砾岩。该层白云岩均有不同程度的褐铁矿化,矿体赋存于构造破碎带;第三岩性段为黑灰色薄层粉砂岩夹薄层灰岩,上部为灰绿色薄层粉砂岩夹泥质灰岩;第四岩性段为灰色-浅灰色灰岩,多具硅化和方解石化。从矿区现阶段勘查结果分析,铜铅矿化限于第二岩性段的构造破碎带,总体上矿体产状与岩层产状一致,元素分带上

铅下铜,似层状、脉状为主。由此可以认为,黄铜矿样品的 Re-Os 同位素的等时线年龄与赋矿地层时代基本一致。

根据阿巴列克区域成矿作用研究(张正伟等,2009),在晚古生代(D_2-C-P_2),塔里木地块西南缘“原特提斯洋”于志留纪关闭后在西昆仑构造带与塔南缘之间沉积了一套泥盆系陆相碎屑岩,构成了铁克里克铜铅矿床的容矿地层。“古特提斯洋”于早石炭世在康西瓦断裂带以南形成,在昆中带(西昆仑构造带)以北的塔南缘形成火山块状硫化物(VMS)和沉积块状硫化物(SMS)多金属矿床(贾群子等,1999),而在其北侧的塔南大陆边缘一侧的陆缘盆地中则沉积了一套台地相碳酸盐岩和砂页岩组合(D_3q-C_1)构成了塔木、卡兰古、阿巴列克、吐洪木列克以及托库孜阿特等铅锌矿床(点)的容矿层位。在陆缘盆地沉积过程中可能形成SEDEX型矿床,我们在塔木矿床中发现钡钾长石,在卡兰古矿床中发现硅质白云岩的含矿层位,都反映有喷流沉积现象存在(杨向荣等,2009)。另一方面,在广泛陆源物质补给的基础上,盆地沉积物富集了Pb、Zn、Cu等成矿元素,可能形成成矿元素初始富集的“矿源层”(涂光炽,1984),成矿元素在地层中初始“富集”的假设得到区域岩石地层剖面的支持(印建平,2003),按涂光炽(1984)的提法,成矿元素丰度达克拉克值的5~10倍以上,即可以构成“矿源岩”。与阿巴列克铜铅矿床处于同一成矿带的塔木矿床闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄337Ma(杨向荣等,2009),也可作为对比。因此,本次测试的黄铜矿样品的 Re-Os 同位素的等时线年龄佐证了与赋矿地层同生成矿作用存在的可能性。

6.2 黄铜矿铼-钨同位素体系及成矿物质来源

首先,在所研究的黄铜矿矿物中,Re、Os 含量有所差别。测定结果显示,分别含有 $626 \times 10^{-9} \sim 14533 \times 10^{-9}$ Re 和 $0.026 \times 10^{-9} \sim 0.36 \times 10^{-9}$ Os。由其 Re 亲铜和铁的地球化学性质,决定从地壳向地核,Re 的丰度值有所提高(黎彤和倪守斌,1990)。在辉钼矿中,Re 的含量可以从微量到高达1.88%。Re 含量的高低与成矿温度及矿物组合有着密切的关系(Gilos and Schilling,1972)。低温矿床中辉钼矿中 Re 的高含量要比高温矿床辉钼矿中常见得多。本次测定的黄铜矿无疑是低温热液矿床成因,是否存在成矿温度控制黄铜矿中铼含量的差异,还需要深入研究。经综合分析对比中国各种类型铜(钼)矿床中辉钼矿的 Re 含量(Mao *et al.*,1999)后认为,从幔源、壳幔混源到壳源,辉钼矿的 Re 含量各递减一个数量级($0.0n \times 10^{-9} \sim 0.n \times 10^{-9}$)。黄铜矿的 Re 含量是否有同样的递减关系,也需要进一步的大量资料证实。

从测试结果看出,该组样品的高 Re 低 Os 含量、高 Re/Os 比值及高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值表明,样品中的 Os 是高放射成因的,与瑞典西南部金矿(Stein *et al.*,2000)和澳大利亚 Victoria 金矿(Arne *et al.*,2001)中硫化物的 Re 和 Os 的浓度、比值和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比都相似,具有明显的壳源特征。表明阿巴列克矿床在海西期经历了同生成矿作用,

矿床类型主要为沉积层控型,成矿物质主要来源于地层,矿化发生在上泥盆统与下石炭统的结合部位,岩性以砂岩与碳酸盐岩组合为主,具有特定的层位控制特点。

7 结论

阿巴列克铜铅矿床中的黄铜矿 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 等时线年龄为 $331 \pm 5.2\text{Ma}$,首次获得本区的精确成矿年龄。由此推断,铜铅矿化时间为海西期,属于地层形成过程中的同生成矿作用产物。从矿床地质研究分析,海西期的成矿作用受到后期其它地质作用的强烈改造,但由于铼-钨同位素体系不易受到后期交代作用影响,而保留了海西期成矿的特征。铼-钨同位素体系显示高 Re 低 Os 含量、高 Re/Os 比值及高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值表明,除了成矿元素来源于陆缘碎屑外,成矿作用很可能存在于早石炭世沉积盆地的地下热水循环过程。

致谢 野外地质考察和样品采集得到桂新矿业公司的帮助,成文过程中得到田培仁高工和成守德高工的指导,国家305项目办给予工作上的大力支持,在此表示真诚的感谢。

References

- Arne DC, Bierlein FP and Morgan JW. 2001. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia. *Economic Geology*, 96: 1455 - 1459
- Chang XS. 2003. Metallogenic characteristics and ore prospects of lead-zinc deposit in east Kunlun area, Xinjiang. *Xinjiang Non-Ferrous Metallurgy*, 26(1): 2 - 4, 8 (in Chinese)
- Chen SD and Xu X. 2001. On compiling of map of tectonics of Xinjiang and neighbouring areas. *Xinjiang Geology*, 19(1): 33 - 37 (in Chinese)
- Ding DG, Wang DX, Liu WX and Sun SQ. 1996. The Orogenes and Basin in West Kunlun. Beijing: Geological Publishing House, 72 - 105 (in Chinese)
- Gilos CL and Schilling JH. 1972. Variation in rhenium content of molybdenite. In: *Proceedings of 24th International Geological Congress*, 24(10): 145 - 152
- Hu QW, Zhu HY and Zhou SH. 2007. Regional ore-controlling conditions of the Tamu-Kalangu Pb-Zn(Cu) ore zone, Xinjiang. *Mineral Resources and Geology*, 21(5): 551 - 554 (in Chinese with English abstract)
- Jia QZ, Li WM, Yu PS, Wu JR, Zhang DS, Gao P and Chen GM. 1999. Massive Sulfide Copper Deposits of West Kunlun, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 130 (in Chinese)
- Kuang WL, Liu JS, Zhu ZQ and Liu SH. 2002. Metallogenesis of Kalangu MVT type lead-zinc deposit and sources of minerogenetic materials in western Kunlun. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(4): 423 - 428 (in Chinese with English abstract)
- Kuang WL, Gu DS, Liu JS and Liu WW. 2005. Probe into fluid inclusions' characteristics of MVT deposit: Western Kunlun district in Xinjiang (China). *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 21(2): 1 - 5 (in Chinese with English abstract)
- Li T and Ni SB. 1990. *Chemistry Element of Earth and Crust*. Beijing: Geological Publishing House, 10 - 25 (in Chinese)
- Ludwig KR. 1994. Isoplot: A plotting and regression program for radiogenic - isotope date. US Geol. Surv. Open-file Report,

- Version 2(75): 91–445
- Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Du AD. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 63(11–12): 1815–1818
- Pan YS. 1990. Tectonic features and evolution of the western Kunlun mountain regions. *Scientia Geologica Sinica*, 25(3): 224–232 (in Chinese with English abstract)
- Qi L, Zhou MF, Wang CY and Sun M. 2007. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP-MS coupled with a modified Carius tube digestion. *Geochemical Journal*, 41(6): 407–414
- Qi L, Zhou MF, Gao JF and Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25: 585–589
- Stein HJ, Morgan JW and Schersten A. 2000. Re-Os dating of Low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas golds deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. *Economic Geology*, 95: 1657–1671
- Tu GC. 1984. *Geochemistry of Stratabound Ore Deposits in China (Volume 1)*. Beijing: Science Press, 1–354 (in Chinese)
- Wang SL, Wang DB and Zhu XY. 2001. The fluid inclusion in MVT lead-zinc deposit in southwest margin of Tarim. *Mineral Resources and Geology*, 15(4): 238–242 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL and Cheng SD. 2001. Crust evolution and mineralization of Xinjiang Uygur Autonomous region. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 129–143 (in Chinese with English abstract)
- Yang XR, Peng JT and Hu RZ. 2009. Discussing on Rb-Sr isotopic dating of sphalerite. *Geological Review*, 55(3): 370–374 (in Chinese with English abstract)
- Yin JP, Tian PR, Qi XX and Chen KQ. 2003. Characteristics of geology and geochemistry of ore-bearing formation in Tamu-Kalangu lead-zinc-copper ore belts in western Kunlun Mountain. *Geoscience*, 17(2): 143–150 (in Chinese with English abstract)
- Yuan B. 2007. Study of geological characteristics and enrichment regularities of mineralization of Kalangu-Tamu lead-zinc deposits, West Kunlun, Xinjiang. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1–84 (in Chinese with English summary)
- Zhang ZW, Peng JT, Xiao JF, Zhu XQ, Shen NP, Zhang ZS and You FH. 2009. Regional metallogenic tectonics of the lead-zinc deposits zone in southwestern margin of the Tarim Plate. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(4): 318–329 (in Chinese with English abstract)
- Zhu XY, Wang DB and Wang SL. 1998. Geology and sulfur isotope geochemistry of the Tamu-Kalangu lead-zinc deposits, Akto County, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 17(3): 204–214 (in Chinese with English abstract)
- 有色金属, 26(1): 2–4, 8
- 成守德, 徐新. 2001. 新疆及邻区大地构造编图研究. *新疆地质*, 19(1): 33–37
- 丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 孙世群. 1996. 西昆仑造山带与盆地. 北京: 地质出版社, 72–105
- 胡庆雯, 朱红英, 周圣华. 2007. 新疆塔木-卡兰古铅-锌(铜)矿带区域控矿条件. *矿产与地质*, 21(5): 551–554
- 贾群子, 李文明, 于浦生, 邬介人, 张东生, 高鹏, 陈贵民. 1999. 新疆西昆仑块状硫化物铜矿床. 北京: 地质出版社, 1–130
- 匡文龙, 刘继顺, 朱自强, 刘石华. 2002. 西昆仑地区卡兰古 MVT 型铅锌矿床成矿作用和成矿物质来源探讨. *大地构造与成矿学*, 26(4): 423–428
- 匡文龙, 古德生, 刘继顺, 刘文伟. 2005. 西昆仑地区密西西比河谷型矿床的流体包裹体特征研究. *有色矿冶*, 21(2): 1–5
- 黎彤, 倪守斌. 1990. 地球和地壳的化学元素丰度. 北京: 地质出版社, 10–25
- 潘裕生. 1990. 西昆仑构造特征与演化. *地质科学*, 25(3): 224–232
- 涂光炽. 1984. *中国层控矿床地球化学(第一卷)*. 北京: 科学出版社, 1–354
- 王书来, 汪东波, 祝新友. 2001. 塔里木西南缘 MVT 型铅锌矿床流体包裹体研究. *矿产与地质*, 15(4): 238–242
- 王元龙, 成守德. 2001. 新疆地壳演化与成矿. *地质科学*, 36(2): 129–143
- 杨向荣, 彭建堂, 胡瑞忠. 2009. 闪锌矿铷-锶同位素等时线讨论. *地质论评*, 55(3): 370–374
- 印建平, 田培仁, 戚学祥, 陈克强. 2003. 西昆仑塔木-卡兰古铅锌铜矿带含矿岩系的地质地球化学特征. *现代地质*, 17(2): 143–150
- 袁波. 2007. 新疆西昆仑卡兰古、塔木铅锌矿地质特征和矿化富集规律研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1–84
- 张正伟, 彭建堂, 肖加飞, 朱笑青, 沈能平, 张中山, 游富华. 2009. 塔西南缘沉积岩层控型铅锌矿带区域构造控矿作用. *矿物岩石地球化学通报*, 28(4): 318–329
- 祝新友, 汪东波, 王书来. 1998. 新疆阿克陶塔木-卡兰古铅-锌带矿床地质和硫同位素特征. *矿床地质*, 17(3): 204–214

附中文参考文献

- 常雪生. 2003. 新疆西昆仑地区铅锌矿成矿特征与找矿前景. *新疆*