

文章编号: 0258-7106(2013)05-0972-07

# 山西刁泉银铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄 及其地质意义<sup>\*</sup>

牛翠祎<sup>1,2</sup>, 卿 敏<sup>2</sup>, 唐明国<sup>1,2</sup>, 李 超<sup>3</sup>, 张玉杰<sup>2</sup>, 李艳秋<sup>2</sup>

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国人民武装警察部队黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000;

3 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘要** 为了查明山西刁泉银铜多金属矿床矿化发生的时间, 作者采集了6件辉钼矿样品进行Re-Os同位素测试, 获得等时线年龄为( $131.9 \pm 2.9$ ) Ma, MSWD=1.7, 样品的加权平均年龄为( $132.01 \pm 0.85$ ) Ma, MSWD=1.05, 略晚于矽卡岩型铜矿化形成的时间。山西刁泉银铜矿床成矿地质年龄, 与晋东北地区燕山期火山-次火山岩形成的时间基本相同, 说明次火山岩体与成矿关系密切, 次火山岩体为刁泉银铜矿床的形成提供了成矿物质和热源。刁泉银铜矿床的形成时间与华北地台大规模成矿时代一致, 形成于板内构造环境, 为华北地台深部岩石圈减薄背景下古老造山带活化的产物, 形成于华北地台东部构造体制转换时期。

**关键词** 地球化学; 辉钼矿 Re-Os 年龄; 同位素; 银铜矿; 山西刁泉

中图分类号: P618.52; P618.41

文献标志码: A

## Molybdenite Re-Os age of Diaoquan silver-copper polymetallic deposit in Shanxi Province and its geological significance

NIU CuiYi<sup>1,2</sup>, QING Min<sup>2</sup>, TANG MingGuo<sup>1,2</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, ZHANG YuJie<sup>2</sup> and LI YanQiu<sup>2</sup>

(1 School of Earth Science and Resource, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2 Gold Geological Institute of CAPF, Langfang 065000, Hebei, China; 3 National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

### Abstract

In order to date the metallogeny of the Diaoquan silver-copper polymetallic deposit, the authors selected and analyzed six molybdenite samples from this ore deposit. The Re-Os isotopic model ages range from 130.5 Ma to 132.8 Ma, with an isochron age of ( $131.9 \pm 2.9$ ) Ma(MSWD=1.7) and an weighted average age of ( $132.01 \pm 0.85$ ) Ma(MSWD=1.05). The molybdenite was formed at 132 Ma, later than the formation of copper minerals. The rock-forming and ore-forming processes of the Diaoquan silver-copper polymetallic deposit took place simultaneously with the Yanshanian volcanic and subvolcanic activities in northeastern Shanxi, which suggests that the sub-volcanic rocks had close relationship with metallogeny and provided metallogenetic matter and heat for the Diaoquan silver-copper deposit. The Diaoquan silver-copper polymetallic deposit was formed during the large-scale metallogenetic activity in the northeast platform and occurred in a continental intraplate tectonic setting. As a result of re-activation of ancient orogeny under the background of thinning of the deep lithosphere, the Diaoquan deposit was formed during the transformation of tectonic regime in the east of the northeast platform.

\* 本文得到国家危机矿山“晋东北-内蒙古中部地区火山岩型金多金属矿床成矿规律总结研究”(项目编号: 20089925)项目的资助

第一作者简介 牛翠祎, 女, 1970年生, 在职博士生, 高级工程师, 主要从事金多金属矿产勘查和研究工作。Email: Niucuiyi@hotmail.com, 1273562971@qq.com

收稿日期 2012-09-27; 改回日期 2013-07-24。张绮玲编辑。

**Key words:** geochemistry, molybdenite Re-Os age, isotope, silver-copper deposit, Diaoquan in Shanxi

山西刁泉银铜多金属矿床是在晋东北铜钼铅锌多金属成矿带上新近发现的矿床, 在空间上与中生代火山-次火山岩关系密切, 研究程度很低, 有关矿床的形成时代、矿床与中生代火山-次火山岩之间存在怎样的关系, 以及银铜多金属成矿的构造环境等一系列最为基本的科学问题尚未得到解决, 这在很大程度上影响着对矿床成因和成矿规律的认识。同位素年代学是矿床学研究的重要内容之一, 对于认识矿床成因、成矿作用与其他地质作用之间的关系, 以及地质找矿模型的建立等都具有理论和实际意义。辉钼矿作为斑岩型-矽卡岩型铜钼矿床主要的金属矿物之一, 其 Re-Os 体系可精确地确定硫化物成矿的年龄(Luck et al., 1982; Stein et al., 1998; Selby et al., 2001; Barra et al., 2003), 因此辉钼矿年龄可直接代表硫化物形成年龄(Minster et al., 1979)。本文采用辉钼矿 Re-Os 法定年技术, 精确地测定了刁泉银铜多金属矿床的成矿年龄, 并对以上问题作进一步的分析探讨, 以期推动区域相关矿床成矿作用的研究和找矿工作的深入开展。

## 1 矿床地质概况

山西刁泉银铜多金属矿床位于山西省灵丘县境内, 大地构造上处于华北地台中部, 北东向太行造山带与近东西向燕山造山带的过渡转换部位(图 1)。刁泉银铜多金属矿床处在呈北东向展布的峡谷-四角台背斜的北西翼。区内出露地层主要为寒武系灰岩、碎屑岩和奥陶系白云岩、灰质白云岩和侏罗纪的中酸性火山岩。岩浆岩主要为燕山期的火山-次火山岩体, 形成时代为 140~132 Ma(将另文发表), 受北西向小彦-枪头岭断裂和北东向凤凰山断裂的交会部位控制。刁泉杂岩体是矿区重要地质体, 主要由黑云母石英二长岩、花岗斑岩和石英斑岩组成。野外调查表明, 黑云母石英二长岩发育于杂岩体外围, 并被花岗斑岩脉(体)穿切, 岩体与围岩接触带发育热接触变质作用形成的大理岩、角岩及热液蚀变的矽卡岩(图 1)。银铜矿体围绕岩体呈环状分布, 主要产于黑云母石英二长岩与寒武系、奥陶系接触带的矽卡岩带中, 呈透镜状、扁豆状和月牙状。花岗斑岩中发生了钼矿化, 辉钼矿呈脉状产于花岗斑岩中, 形成辉钼矿石英脉(刁泉)。围岩蚀变为大理岩化、

角岩化、石榴子石化、透辉石化、绿泥石化、绿帘石化、阳起石化、绢云母化、硅化、钾化和碳酸盐化等。矿石矿物以黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、辉银矿、自然银、磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿为主, 其次为磁黄铁矿、毒砂、黝铜矿、辉铋矿、辉钼矿、硫铜银矿、含银辉铜矿、硫铋铜矿、碲银矿、针硫铋铅矿、银铜金矿、硒银矿; 脉石矿物主要为石榴子石、方解石、白云石, 其次为透辉石、阳起石、石英、云母及黏土类矿物等。

## 2 样品和测试方法

### 2.1 样品及处理

本次用于测定辉钼矿 Re-Os 同位素年龄的样品分别采自矽卡岩型矿化(体)和花岗斑岩体中的辉钼矿, 采样位置见图 2, 样品特征见表 1。所采样品分布总体较为均匀, 具有较强的代表性。辉钼矿包括 2 种产状: 一种呈细脉状充填于岩矿石裂隙中, 构成辉钼矿-石英脉, 其中的辉钼矿呈叶片状、弯曲状, 粒度较为粗大; 另一种呈稀疏浸染状、团块状产于花岗斑岩中, 辉钼矿多为半自形, 分布均匀, 粒度较为细小。辉钼矿均采用人工破碎重砂淘洗法从样品中分离出来, 最后在双目镜下挑纯。样品挑选工作由河北省廊坊市区域地质调查队完成。挑选出的辉钼矿单矿物在显微镜下检查, 纯度大于 99%, 晶体无氧化、无污染。

### 2.2 样品化学处理流程及测试方法

Re-Os 同位素定年是一种相对成熟且运用比较广泛的金属矿床同位素定年方法, 已经积累了不少测试资料(杜安道等, 1994; 2001; 屈文俊等, 2003; Wang et al., 2005)。辉钼矿的 Re-Os 同位素测试在国家地质实验测试中心进行, Re、Os 化学分析分离步骤和质谱测定主要包括分解样品、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 和质谱测定 4 个步骤, 详见参考文献(杜安道等, 1994; Du et al., 2004; 李超等, 2009; 屈文俊等, 2003; 2004)。

## 3 分析结果

普 Os 是根据原子量表(Wieser, 2006)和同位素丰度表(Bohlke et al., 2005), 通过<sup>192</sup>Os/<sup>190</sup>Os 测量

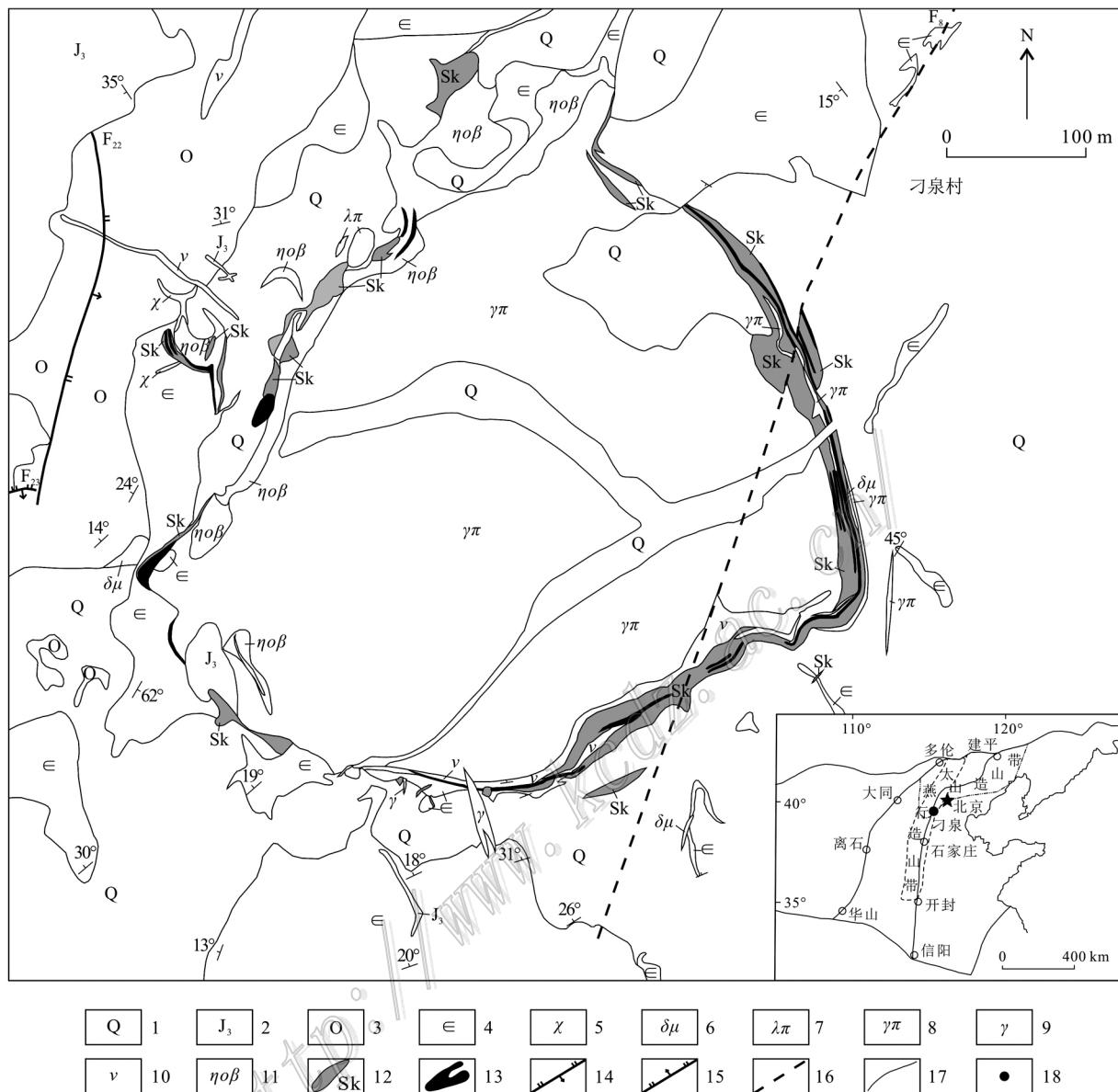


图1 山西灵丘刁泉银铜矿床矿区地质图

1—第四系沉积物；2—上侏罗统；3—奥陶系白云岩；4—寒武系灰岩、碎屑岩；5—煌斑岩；6—闪长玢岩；7—石英斑岩；8—花岗斑岩；9—花岗岩；10—辉长岩；11—黑云母石英二长岩；12—矽卡岩；13—矿体；14—逆断层；15—正断层；16—性质不明断层；17—地质界线；18—刁泉银铜矿

Fig. 1 Geological map of the Diaocuan silver-copper deposit in Lingqiu, Shanxi Province

1—Quaternary sedimentary; 2—Upper Jurassic; 3—Ordovician dolomite; 4—Cambrian limestone and clastic rock; 5—Lamprophyre; 6—Diorite porphyry; 7—Quartz porphyry; 8—Granitic porphyry; 9—Granite; 10—Gabbro; 11—Biotite quartz monzonite; 12—Skarn; 13—Ore body; 14—Reverse fault; 15—Normal fault; 16—Unknown fault; 17—Geological boundary; 18—Diaocuan silver-copper deposit

比计算得出。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；置信水平 95%。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%)，置信水平 95%。按照杜安道等

(1994) 和屈文俊等(2003)给出的公式，计算辉钼矿的模式年龄(Ma)，其中<sup>187</sup>Re 衰变常数采用  $1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$  (Simoliar et al., 1996)。采用 Ludwig (2003) 方法对有关辉钼矿的 Re、Os 同位素数据进行处理并获得 Re-Os 等时线年龄。

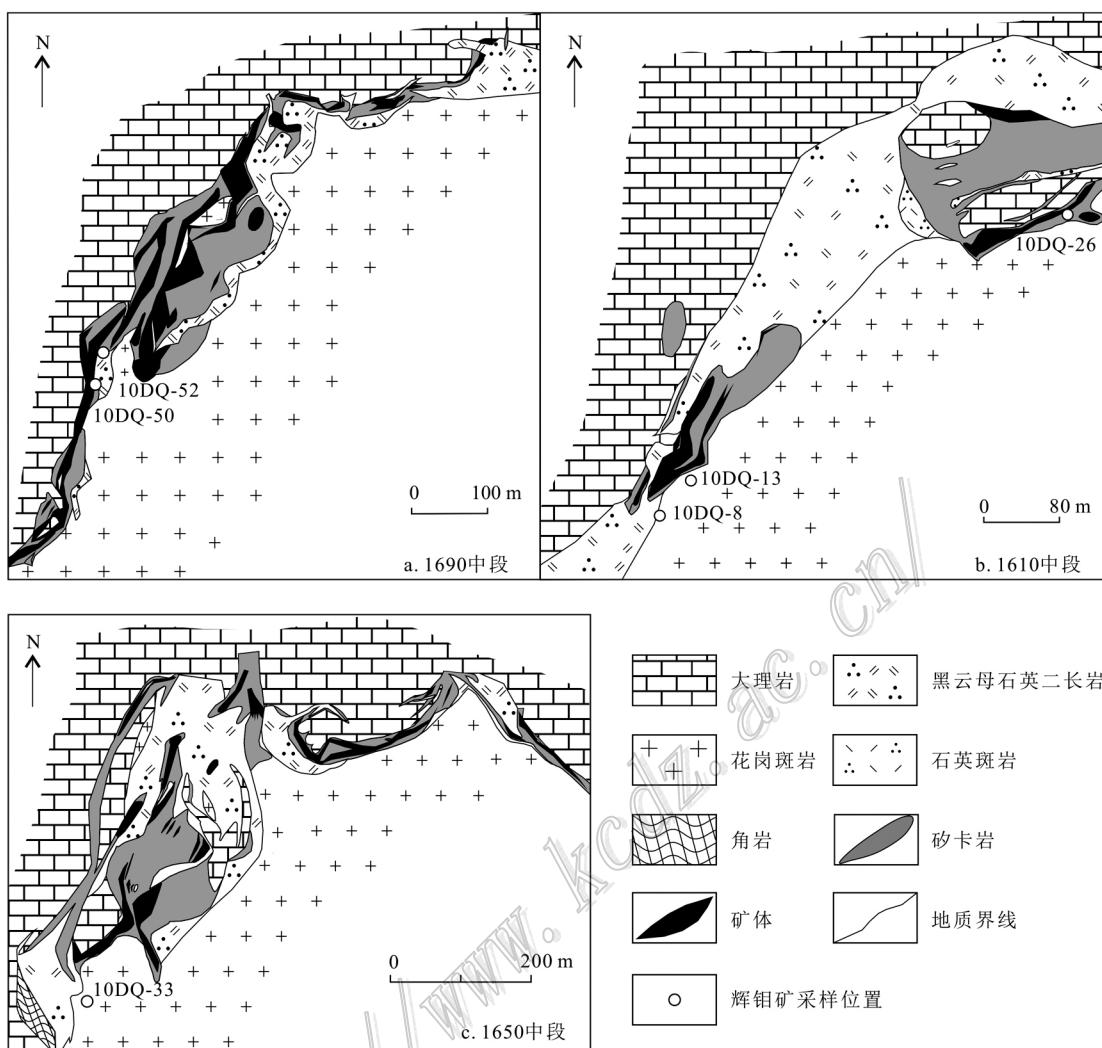


图 2 辉钼矿 Re-Os 年龄采样位置分布图

Fig. 2 Distribution of molybdenum samples for Re-Os age

表 1 山西省刁泉银铜矿床辉钼矿样品特征

Table 1 Characteristics of molybdenite samples from the Diaoquan silver-copper deposit, Shanxi Province

样品号	采样位置	样品特征
10DQ-8	1610 m 中段 55 线南穿掌子头	花岗斑岩, 中间有细脉, 沿裂隙充填的辉钼矿
10DQ-13	1610 m 中段 54 线南穿掌子头	花岗斑岩, 见沿裂隙充填的辉钼矿
10DQ-26	1610 m 中段 42 线, 距北东掌五头约 15 m	透辉石矽卡岩带, 见石英脉, 石英脉中辉钼矿化, 呈细脉状与石英共生, 石英脉型辉钼矿化穿切黄铜矿化、透辉石矽卡岩, 为较晚期产物
10DQ-33	1650 m 中段 56 线附近	花岗斑岩, 斑岩中见沿裂隙分布的辉钼矿
10DQ-50	1690 m 中段 56 线穿脉与主巷交叉处	大理岩, 角岩, 中间见沿裂隙分布的辉钼矿, 辉钼矿与石英脉共生, 形成宽 0.5~1 cm 的辉钼矿石英脉
10DQ-52	1690 m 中段 55A 线穿脉与主巷交叉处往北距穿脉口 5 m 处	花岗斑岩中见裂隙分布的辉钼矿, 呈石英辉钼矿细脉

山西刁泉银铜多金属矿床的辉钼矿样品同位素测试结果见表 2。由表可知, 辉钼矿中 Re 与 Os 含量变化协调, 给出的 6 件模式年龄为  $(130.5 \pm 2.6)$

$\text{Ma} \sim (133.0 \pm 1.9) \text{ Ma}$ , 加权平均年龄为  $(132.01 \pm 0.85) \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 1.05$ )。利用 Isoplot 3 软件 (Ludwig, 2003) 对所测的 6 个数据进行 Re-Os 等时

线拟合, 线性关系很好(图4), 获得等时线年龄为 $(131.9 \pm 2.9)$  Ma(MSWD=1.7)。Re、Os同位素测试结果表明, 不同采样位置辉钼矿样品中的Re、Os含量相近, 6件辉钼矿样品等时线年龄的MSWD值较小, 说明等时线年龄可靠。 $^{187}\text{Os}$ 初始值接近于0,

表明辉钼矿形成时几乎不含 $^{187}\text{Os}$ , 辉钼矿中的 $^{187}\text{Os}$ 系由 $^{187}\text{Re}$ 衰变形成, 符合Re-Os同位素体系模式年龄计算条件, 且模式年龄的加权平均值和等时线年龄吻合较好, 说明所获等时线年龄代表辉钼矿的结晶时间。

表2 山西刁泉银铜矿床辉钼矿Re-Os同位素分析结果

Table 2 Re-Os isotopic data for molybdenite from the Diaoquan silver-copper deposit, Shanxi Province

原样号	$m/\text{g}$	$w(\text{Re})/\mu\text{g.g}^{-1}$		$w(\text{普 Os})/\text{ng.g}^{-1}$		$w(^{187}\text{Re})/\mu\text{g.g}^{-1}$		$w(^{187}\text{Os})/\text{ng.g}^{-1}$		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
10DQ-13	0.03088	73.92	1.47	0.0087	0.0195	46.46	0.92	101.4	0.9	130.8	3.0
10DQ-33	0.02004	11.01	0.09	0.0159	0.0357	6.919	0.055	15.35	0.14	133.0	1.9
10DQ-50	0.02008	12.36	0.09	0.0337	0.0357	7.771	0.059	16.97	0.17	130.9	2.0
10DQ-52	0.00138	29.67	0.41	0.0956	0.4284	18.65	0.26	40.57	0.50	130.5	2.6
10DQ-8	0.01276	21.12	0.19	0.0450	0.0476	13.27	0.12	29.41	0.28	132.8	2.1
10DQ-26	0.02066	50.89	0.40	0.0157	0.0878	31.99	0.25	70.71	0.57	132.5	1.8

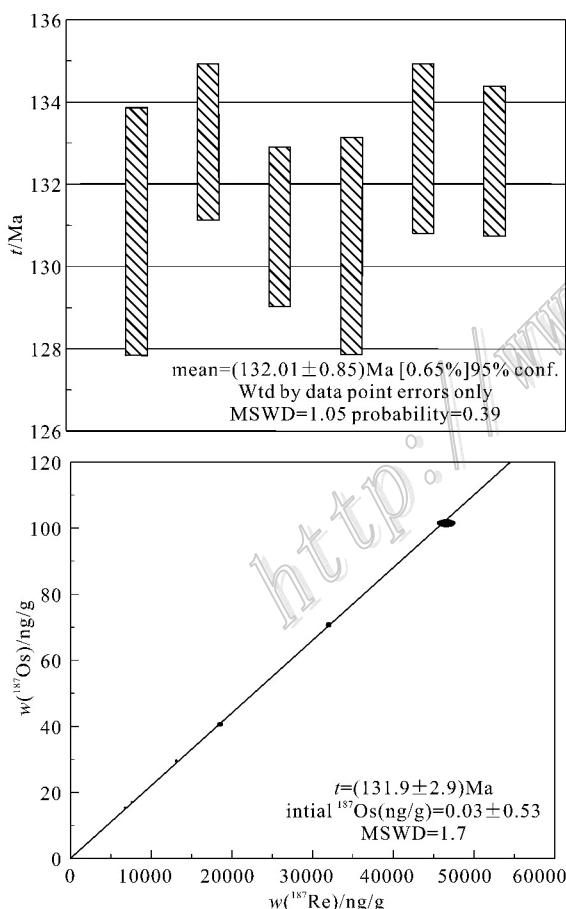


图3 山西刁泉银铜矿Re-Os加权平均年龄(上)及等时线年龄(下)图解

Fig. 3 Plots of Re-Os weighted age (upper) and isochronic age (lower) of molybdenite from the Diaoquan silver-copper deposit, Shanxi Province

## 4 讨论与结论

### 4.1 成矿时代的精确测定

刁泉银铜多金属矿体主要产于杂岩体与寒武系灰岩地层接触带附近, 围绕杂岩体呈环状分布, 且主要赋存于矽卡岩化带中。铜、银、金和钼矿化围绕杂岩体具有带状分布特点, 铜、银、金矿化主要分布于矿床的上部外带, 而钼矿化则主要分布于花岗斑岩体的内接触带。前人根据与矿体有关的次火山岩的年龄推断该矿床形成时代为130 Ma, 而刁泉花岗斑岩黑云母K-Ar年龄为127~130 Ma(李生元, 2000); 本次工作测得黑云母石英二长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为140 Ma, 花岗斑岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为132 Ma(数据另文发表), 辉钼矿的Re-Os年龄132 Ma。本区发育多期次的构造岩浆活动, 其中矽卡岩型银铜矿产于黑云母石英二长岩中, 且被晚阶段的花岗斑岩穿切, 推测矽卡岩型矿化的形成时间早于花岗斑岩, 即矽卡岩型银铜矿化形成于140~132 Ma。辉钼矿的Re-Os年龄为132 Ma, 与花岗斑岩的锆石年龄一致, 说明本区132 Ma左右存在着钼成矿作用, 与刁泉岩体一脉之隔的小彦斑岩型铜钼矿体(杨全林, 2010)的存在也证明了这一点。综上所述, 山西刁泉银铜矿床的成矿时代为早白垩世。

### 4.2 成矿物质来源探讨

研究表明, Re-Os同位素体系不仅可以精确地确

定与辉钼矿共生的硫化物矿床的成矿时代, 而且还可以指示成矿的物质源区。

孟祥金等(2007)通过对我国近年来积累的大量与中酸性岩浆作用有关的铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素数据研究, 根据辉钼矿  $w_{\text{Re}}$  不同的分布范围, 将成矿物质来源确定 3 种来源类型: 地幔或以地幔为主 ( $w_{\text{Re}}$  介于  $100 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$  之间)、壳-幔混合来源 ( $w_{\text{Re}}$  介于  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ ) 和壳源 ( $w_{\text{Re}}$  介于  $1 \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-6}$  或更低)。毛景文等 (Mao et al., 1999) 对中国各种类型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量进行了综合研究, 认为从地幔到壳-幔混源再到地壳, 矿石中的 Re 含量呈十倍地下降, 从与幔源型→I 型→S 型花岗岩有关的矿床, 其辉钼矿的  $w_{\text{Re}}$  呈指数级降低 ( $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ )。本文测定的山西刁泉银铜多金属矿床  $w_{\text{Re}}$  变化于  $11 \times 10^{-6} \sim 73 \times 10^{-6}$  之间, 与壳幔混合来源的辉钼矿 Re 含量一致, 反映刁泉银铜多金属矿床的成矿物质来源与壳幔混合作用相关, 成矿作用与壳幔混合来源的 I 型花岗岩有关, 这与李生元等 (2000) 利用 S、Pb 同位素获得的成矿物质来源的结果较为一致。

#### 4.3 成矿地球动力学背景

该区自中元古代以来一直处于稳定的发展阶段, 属于板内构造环境, 中生代(印支期)华北地台重新活化, 构造岩浆活动由弱到强, 至早白垩世达到高峰(邓晋福等, 2007; 2009; 毛景文等, 2003; 2005; 吴珍汉等, 1999; 代军治等, 2006), 伴随着大规模成矿作用的发生。前人(罗照华等, 2006; 张旗等, 2009; 翟明国等, 2001; 2004)研究认为这是中生代华北地台岩石圈减薄作用的结果。本次测定的刁泉银铜多金属矿床的成矿时代为 140~132 Ma, Re 的含量变化显示出壳-幔混合来源的特点, 这不但说明刁泉银铜多金属矿床的形成与华北地台中生代岩石圈减薄的地球动力学背景有关, 而且反映出正是岩石圈的减薄导致地球内部圈层发生壳-幔相互作用, 古老造山带成为深部岩浆-流体向浅部迁移的有利通道, 并伴随大规模的岩浆活动和成矿作用发生。可见, 刁泉银铜多金属矿床成矿作用具有区域性的构造-成矿背景, 不是一个偶然的成矿事件。葛良胜等 (2012) 认为晋东北成岩成矿作用 (170~110 Ma, 集中于 130~140 Ma) 是早白垩世构造-岩浆-流体活动的产物, 毛景文等 (2003; 2005) 提出华北克拉通中生代存在大规模的成矿事件 (140~130 Ma), 而该时期

正是华北地台构造转换期(翟明国等, 2003; 2004; 许文良等, 2004), 这也与刁泉银铜多金属矿床形成的时代较为吻合。

#### 4.4 结 论

(1) 刁泉银铜多金属矿床成矿作用发生于早白垩世, 成矿作用与次火山岩体密切相关, 它们属于同一期构造-岩浆-成矿作用的产物;

(2) 刁泉银铜多金属矿床的成矿物质具有壳-幔混合来源性质, 以地幔物质为主, 在岩浆-流体向上迁移过程中受到壳源物质的混染;

(3) 刁泉银铜多金属矿床形成于板内构造环境, 为中生代华北地台岩石圈减薄背景下古老造山带活化的产物, 形成于构造体制转换的背景下。

#### 参考文献/References

- 代军治, 毛景文, 杨富全, 叶会寿, 赵财胜, 谢桂青, 张长青. 2006. 华北地台北缘燕辽钼(铜)成矿带矿床地质特征及动力学背景[J]. 矿床地质, 25(5): 598-612.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-锇同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 68(4): 339-347.
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 赵兴国, 周肃, 肖庆辉, 吴宗繁, 耿科. 2007. 华北太行-燕山-辽西地区燕山期(J-K)造山过程与成矿作用[J]. 现代地质, 21(2): 232-240.
- 邓晋福, 冯艳芳, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 周肃, 高延光. 2009. 太行-燕辽地区燕山期造山过程、岩浆源区与成矿作用[J]. 中国地质, 36(3): 623-633.
- 葛良胜, 王治华, 杨贵才, 路英川. 2012. 晋东北燕山期岩浆活动及金多金属成矿作用动力学[J]. 岩石学报, 28(2): 619-636.
- 李超, 屈文俊, 杜安道. 2009. 铑-锇同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. 岩矿测试, 28(3): 233-238.
- 李生元. 2000. 晋东北次火山岩型银锰矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 240 页.
- 罗照华, 魏阳, 辛后田, 柯珊, 李文韬, 李德东, 黄金香. 2006. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄[J]. 地学前缘, 13(6): 52-63.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学——背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D辑), 33(4): 289-299.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 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, 21(1): 171-190.
- 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 刘建光, 屈文俊, 杨竹森, 左力艳, 万禄进, 肖茂章. 2007. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re-Os 年龄

- [J]. 地质学报, 81(7): 946-951.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶液电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-锇地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-262.
- 屈文俊, 杜安道. 2004. 电感耦合等离子体质谱测定辉钼矿中 Re-Os 含量时的质量分馏效应的校正[J]. 质谱学报, 25(增刊): 181-182.
- 吴珍汉, 崔盛芹, 朱大岗, 冯向阳. 1999. 燕山南缘盘山岩体的热历史与构造-地貌演化过程[J]. 地质力学学报, (3): 28-32.
- 许文良, 王清海, 王冬艳, 裴福萍, 高山. 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据[J]. 地学前缘, 11(3): 309-317.
- 杨全林. 2010. 山西灵丘小彦多金属矿床成因及找矿潜力分析[J]. 华北国土资源, (3): 35-37.
- 翟明国, 杨进辉, 刘文军. 2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. 中国科学(D辑), 31(7): 545-552.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学(D辑), 33(10): 913-920.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 2004. 华北东部中生代构造体制转折期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘, 4(3): 285-297.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘, 16(2): 021-051.
- Barra F, Ruiz J, Mathur R and Titley S. 2003. A Re-Os study of sulfide minerals from the Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA[J]. Mineralium Deposita, 38: 585-596.
- Bohlke J K, De Laeter J R, De Bievre P, De Bievre P, Peiser H S, Rosman K J R and Taylor P D P. 2005. Isotopic compositions of the elements, 2001[J]. J. Phys. Chem. Ref. Data, 34(1): 57-67.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, HollyStein R M, Morgan J and Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 28(1): 41-52.
- Luck J M and Allegre C J. 1982. The studies of molybdenites through the  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$  chronometer[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 61: 291-296.
- Ludwig K. 2003. Isoplot/ex. version 3.0 : A geochronological toolkit for microsoft excel[CP]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1-70.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenite in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(11-12): 1815-1818.
- Minster J F, Richard L P and ALLegre C J. 1979. 87Rb-86Sr chronology of enstatite meteorites[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 44: 420-440.
- Selby D and Gresaer R A. 2001. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia[J]. Econ. Geol., 96: 197-204.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, Morgan J W and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kiviso, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting [J]. Mineralium Deposita, 33: 329-345.
- Wang D H, Qu W J, Li Z W, Yin H L and Chen Y C. 2005. Mineralization episode of porphyry copper deposits in the Jinshajiang-Red River mineralization belt: Re-Os dating[J]. Science in China, Ser. D, (2):
- Wieser M E. 2006. Atomic weights of the elements 2005(IUPAC technical report)[J]. Pure. Appl. Chem., 78(11): 2051-2066.