

文章编号: 0258-7106 (2013) 02-0427-09

延边天宝山多金属矿田辉钼矿 Re-Os 同位素 年龄及其地质意义*

张 勇¹, 孙景贵^{1**}, 邢树文², 赵克强¹, 张增杰², 马玉波²

(1 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 延边天宝山为一大型中高温热液多金属(铅, 锌, 铜, 钼等)矿田, 是由新兴铅锌、立山铅锌铜和东风铅锌铜钼 3 个矿床所组成。文章在矿田地质特征研究的基础上, 进行了辉钼矿 Re-Os 同位素体系定年研究, 得到结果 $w(\text{Re})$ 为 $0.353 \sim 9.306 \mu\text{g/g}$, 模式年龄为 $174.7 \sim 200.3 \text{ Ma}$, 加权平均值年龄为 $(194.6 \pm 3.9) \text{ Ma}$, 等时线年龄为 $(196.6 \pm 2.5) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.94$, $n=9$), 表明天宝山多金属矿田为早侏罗世岩浆作用及相关流体活动的产物, 形成于华北板块和西伯利亚板块碰撞拼合后伸展环境, 初步认为成矿物质来源主要为壳源。结合区域上已有的高精度年代学数据, 将吉林省中东部山区钼成矿作用划分为 2 期: 早侏罗世 ($196.6 \sim 186 \text{ Ma}$) 和中侏罗世 ($176.9 \sim 166.9 \text{ Ma}$), 且以中侏罗世钼矿化最为发育。

关键词 地球化学 Re-Os 同位素测年 钼成矿作用 天宝山多金属矿田 延边

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

Re-Os dating of molybdenite from Tianbaoshan polymetallic orefield in Yanbian and its geological significance

ZHANG Yong¹, SUN JingGui¹, XING ShuWen², ZHAO KeQiang¹, ZHANG ZengJie² and MA YuBo²

(1 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Tianbaoshan orefield, a large hydrothermal polymetallic (lead, zinc, copper, molybdenum) orefield in Yanbian, is composed of Xinxing lead-zinc deposit, Lishan lead-zinc-copper deposit and Dongfeng lead-zinc-copper-molybdenum deposit. On the basis of geological features, the authors carried out Re-Os dating, and the results show that the Re content of the molybdenite varies from 0.353×10^{-6} to 9.306×10^{-6} , the model ages range from 174.7 to 200.3 Ma with the weighted mean age being $(194.6 \pm 3.9) \text{ Ma}$ and the isochron age bring $(196.6 \pm 2.5) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.94$, $n=9$). These data indicate that molybdenum mineralization took place in early Jurassic, and the geodynamic setting was closely related to the extension from the continental collision between the North China Plate and the Siberia Plate. The ore-forming materials might have been derived mainly from the crust. Combined with the high precision chronologic data of regional intrusions, the authors have arrived at the conclusion that Mo mineralization of the middle and east part of Jilin Province can be divided into 2 epochs: Early Jurassic ($196.6 \sim 186 \text{ Ma}$) and Middle Jurassic ($176.9 \sim 166.9 \text{ Ma}$), with the Middle Jurassic e-

* 本文得到中国地质调查计划项目(资[2010]矿评 01-26-06)、吉林省科技发展规划项目(批准号: 20100450)和国家自然科学基金项目(批准号: 41172072)的联合资助

第一作者简介 张 勇, 男, 1982 年生, 在读博士, 主要从事矿床地质的研究。Email: yongzhangcc@163.com

** 通讯作者 孙景贵, 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事大陆内生金属矿床成因与成矿规律研究。Email: sunjinggui@jlu.edu.cn

收稿日期 2012-04-19; 改回日期 2012-12-12。秦思婷编辑。

poch having stronger mineralization.

Key words: geochemistry, Re-Os isotopic dating, molybdenum mineralization, Tianbaoshan polymetallic orefield, Yanbian

天宝山多金属矿田位于中国东北部陆缘、兴蒙造山带的东端,由新兴铅-锌矿床、东风铅-锌-铜-钼矿床和立山铜-铅-锌矿床组成,作为铅-锌-铜-钼多金属矿田,一直受到科研工作者的关注。前人对延边天宝山多金属矿田的矿床地质特征(宋贵,1984;孙景贵等,2006)、成矿物质来源(李宝树等,1991;刘劲鸿等,2000;孙景贵等,2006)、成矿预测(金尚林等,1984)、成矿物理化学条件(张勇等,2012)等方面进行了研究,初步确立该矿田是由岩浆热液隐爆角砾岩型和岩浆热液接触交代矽卡岩型矿床组成(张勇等,2012)。而成岩成矿时代的厘定尚缺乏精确的同位素年龄数据,前人主要依据 K-Ar、Rb-Sr 等方法得到与成矿相关岩体成岩的年龄,部分学者认为矿田经历了晚华力西期—早印支期和晚印支期—早燕山期的叠加成矿(李宝树等,1991;彭玉鲸等,2009),但也有学者提出成矿为燕山期(徐仁杰等,2010)。显然,争议的焦点在成矿年代上,而前人的测试方法容易受后期构造热事件影响,可信度差,不能准确代表

成矿年龄,用岩体年龄来代表矿化年龄可能导致成矿年龄不能得到准确的约束,因此,取得矿化年龄的可靠数据十分必要。

为了深入研究天宝山矿田的成矿时代,本文对矿田进行了辉钼矿 Re-Os 定年,获得高精度的 Re-Os 同位素等时线年龄,精确限定了该矿田的成矿年龄。结合研究区已有的成岩成矿年龄,划分了吉林省中东部山区钼成矿作用的期次,以期对深入认识该区的区域成矿规律和未来地质找矿战略部署提供科学依据。

1 区域地质背景及矿床地质特征

天宝山多金属矿田位于吉林省延边朝鲜族自治州龙井市天宝山镇北部(图 1b),地处兴蒙造山带的东端,狭于兴凯地块和佳木斯地块与华北板块之间,是一个经历了古亚洲洋演化、兴蒙造山和中生代太平洋板块俯冲作用的复合构造区(图 1a)。区域内出

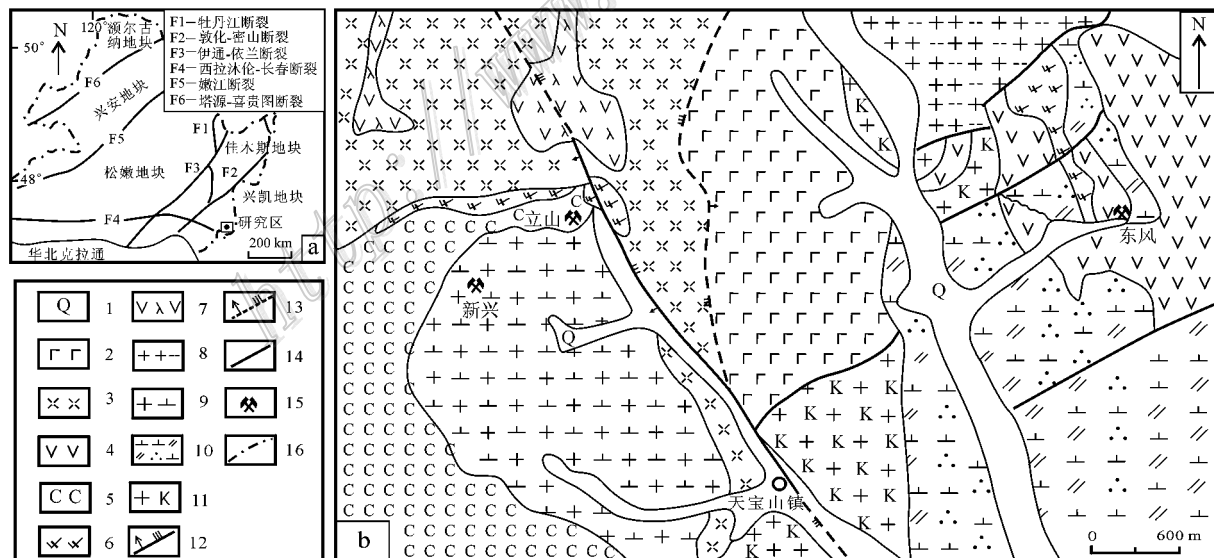


图 1 研究区大地构造位置(a)和矿田地质略图(b)

1—第四系;2—白垩系三仙岭组中酸性火山岩;3—侏罗系中基性熔岩;4—二叠系庙岭组中性火山岩夹碳酸盐岩;5—上石炭统山秀岭组碳酸盐岩;6—英安斑岩;7—安山玢岩;8—斑状黑云母花岗岩;9—花岗闪长岩;10—石英二长闪长岩;11—钾长花岗岩;12—实测压性断层;13—推测压性断层;14—实测断层;15—矿床;16—国界

Fig. 1 Geological map showing the tectonic location (a) and orefield geology (b) of the study area

1—Quaternary; 2—Intermediate-acid volcanics of Cretaceous Sanxianling Formation; 3—Jurassic basic intermediate lava; 4—Intermediate volcanics interbedded with carbonate rocks of Permian Miaoling Formation; 5—Carbonate rocks of Upper Carboniferous Shanxiuling Formation; 6—Dacite-porphry; 7—Andesitic porphyrite; 8—Porphyritic biotite granite; 9—Granodiorite; 10—Quartz monzodiorite; 11—Moyite; 12—Measured compressional fault; 13—Inferred compressional fault; 14—Measured fault; 15—Deposit; 16—National boundaries

露的地层主要有上石炭统山秀岭组、下二叠统青龙村群(张艳斌,2002)、下白垩统屯田营组(李超文等,2010)和新近系船底山组;侵入体有海西期闪长岩-花岗闪长岩-二长闪长岩、印支期辉石岩-辉长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩以及燕山期花岗岩等(Zhang et al.,2004)。

矿田发育在天宝山岩体的内部和岩体与上石炭统山秀岭组、二叠系庙岭组的接触带上(图 1b)。其中,新兴铅锌矿床赋存在花岗闪长岩体内部,矿体以角砾岩为特征;东风铅锌铜钼矿床分别产于中性火山碎屑岩和中部酸性熔岩与灰岩互层的灰岩中或接触带处,赋矿层位多样;立山铅锌铜矿床赋存于头道沟花岗闪长岩、英安斑岩与碳酸盐岩的接触带中。金尚林等(1984)研究表明,天宝山矿田 3 个矿床的铅锌矿化类型和矿物共生组合虽有差别,但成矿物质来源是相同的,黄铜矿呈浸染状产在矽卡岩中,与方铅矿、闪锌矿密切共生(图 2b),辉钼矿呈团块状、浸染状产在石英脉中,大量金属矿物是在同一成矿阶段

形成的,方铅矿和闪锌矿尤其如此,矿石中黄铜矿的含量由立山到东风矿床逐渐增加。具体矿化蚀变特征、矿化阶段详见表 1。

2 样品及分析方法

辉钼矿样品均采自东风矿床成矿的石英-辉钼矿阶段,主要为石英脉型钼矿石(图 2c),呈团块状和浸染状分布于含辉钼矿石英脉中。经无污染粉碎,通过重力、磁力进行分离,并在双目镜下挑选,最终得到新鲜、无氧化、纯度大于 99% 的粉末状辉钼矿。单矿物提纯过程中,通过不断的粉碎和混合达到了颗粒的细化均一,以避免 Re-Os 同位素的失藕影响(Selby et al.,2004)。

Re-Os 同位素测试工作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(实验仪器为 ELAN DRC-e ICP-MS)和国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室(实验仪器为 TJA X-series ICP-MS)进行。

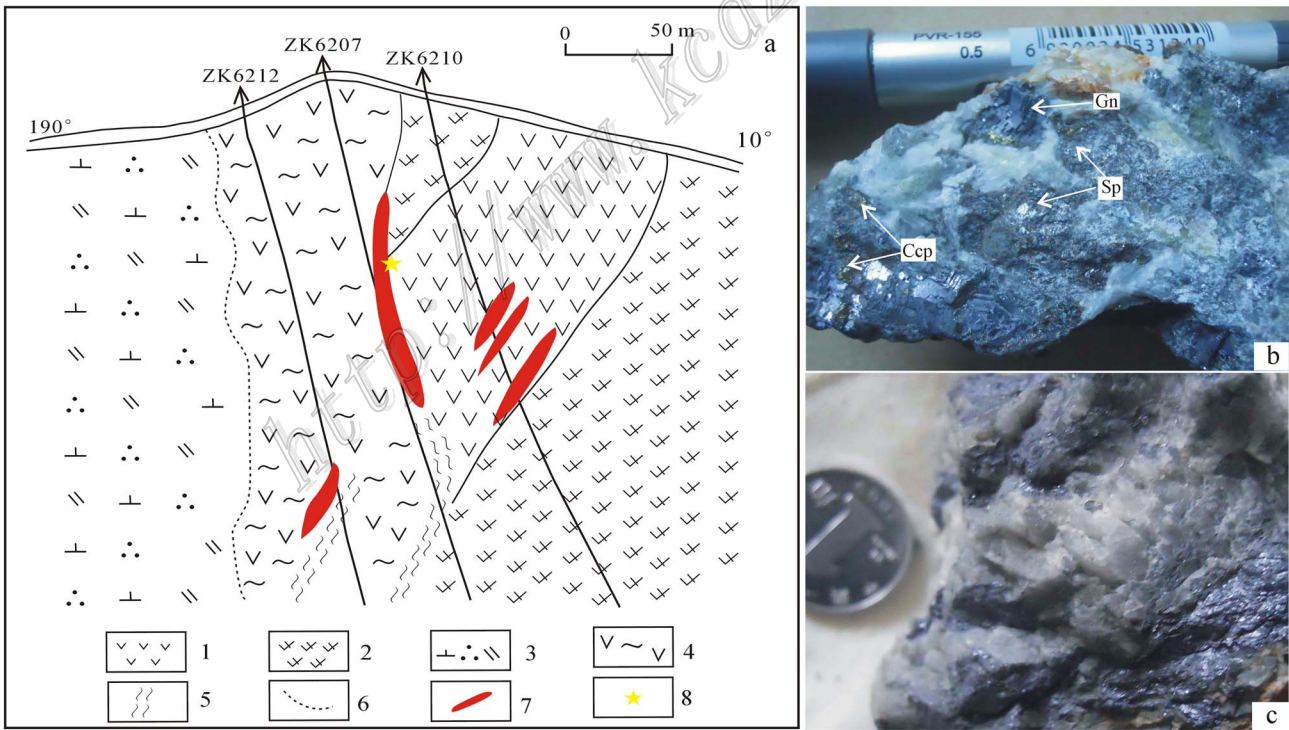


图 2 东风矿床剖面图(a)及手标本照片(b,c)

a. 东风矿床剖面图; b. 黄铜矿、方铅矿、闪锌矿密切共生; c. 辉钼矿

1—二叠系安山岩; 2—二叠系英安岩; 3—石英二长闪长岩; 4—混杂安山岩; 5—破碎带; 6—接触界线; 7—矿体; 8—取样位置

Fig. 2 Sectional drawing(a)and photos of rock hand specimens(b,c)from the Dongfeng deposit

a. Sectional drawing of Dongfeng deposit; b. Chalcopyrite closely associated with galena and sphalerite; c. Molybdenite

1—Permian andesite; 2—Permian dacite; 3—Quartz monzodiorite; 4—Hybrid andesite; 5—Fracture zone; 6—Contact boundary; 7—Ore body;

8—Sampling site

表 1 天宝山多金属矿田地质特征

Table 1 Characteristics of the Tianbaoshan polymetallic orefield

矿床	围岩及控矿构造	矿体形态及规模	矿石矿物共生组成、结构、构造	蚀变类型及矿化阶段	成因类型
新兴铅-锌矿床	产于头道沟花岗闪长岩岩体(出露于立山-陈才沟区)内的角砾岩筒中,头道沟 EW 向断裂、新兴-陈财沟 NW 向断裂和卫星 SN 向断裂交汇部位	平面上呈椭圆形,长轴 54~68 m,短轴 28~36 m。剖面上呈漏斗形,矿体深至 320 m,岩筒向 290° 方向倾伏,倾向角 53°。铅品位 1.52%,锌品位 2.99%,金属量为 3.52 万 t (徐仁杰等,2010)	矿石共生矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿,少量黄铁矿;脉石矿物以石英、方解石、绿帘石类为主,其次为绿泥石、透闪石、绢云母等。矿石结构以自形、半自形粒状结构为主,发育浸蚀结构、乳滴状结构、共生边结构以及包晶结构。矿石呈角砾状、稠密浸染状和稀疏浸染状构造	角砾岩筒内以硅化、绢英岩化为主,其次为碳酸盐化,边部以青磐岩化为主,局部发育钾长石化、黑云母化以及高岭土化等。主体可划分石英-黄铁矿阶段、石英-闪锌矿-方铅矿-黄铜矿多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段;成矿温度 130~340℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 和密度分别为 0.62%~9.86%, 0.37~1.00 g/cm ³ , 压力为 37.31~87.69 MPa (张勇等,2012)	岩浆热液隐爆角砾岩型
东风铅-锌-铜-钼矿床	产在下二叠统庙岭组下部层位的中酸性火山碎屑岩、庙岭组中部层位及石英二长闪长岩与下二叠统庙岭组火山岩的接触带附近,断裂带交汇部位	多金属硫化物矿体与地层产状一致,多呈似层状产出(图 2a)。矿带走向 310~340°, 长 1300 m 左右,宽 200~300 m,倾向 SW, 倾角 30~55°;少数辉钼矿石英英脉矿体呈脉状产出。铅品位为 0.14%, 锌品位为 2.45%, 铜品位为 0.27%, 钼品位为 0.116%, 金属量为 24.91 万 t (徐仁杰等,2010)	矿石共生矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、辉钼矿;脉石矿物主要为石英和方解石。矿石结构主要表现自形、半自形、他形粒状结构、浸蚀交代结构、乳滴状结构和结状结构等。矿石构造主要表现为块状构造、浸染状构造、脉状构造、条带状构造和斑杂状构造等	围岩蚀变主要有绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、碳酸盐化、硅化等。主体可划分石英-辉钼矿阶段、石英-闪锌矿-方铅矿-黄铜矿多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段;成矿温度 101~337℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 和密度分别为 7.16%~23.95%, 0.96~1.12 g/cm ³ , 压力为 28.23~56.64 MPa (张勇等,2012)	岩浆热液接触交代矽卡岩型
立山铜-铅-锌矿床	产于头道沟花岗闪长岩(出露于立山-陈才沟区)、英安斑岩相夹的碳酸盐岩地层内,压性层间断裂内及侵入接触部位	呈透镜状、板状、脉状等。矿带长 700 m,宽 500 m,延深大于 800 m。矿带上部向 NW 倾伏,下部向 W 倾伏,倾向角 30~50°。铜品位为 0.16%, 铅品位为 1.15%, 锌品位为 1.94%, 金属量为 38.17 万 t (徐仁杰等,2010)	矿石组构因产出特征不同分为 3 种:① 在闪锌矿、黄铜矿、方铅矿脉之间分布角砾,整体为胶结角砾状构造,呈中粗粒半自形结构;② 呈浸染状、斑点状黄铜矿、方铅矿、闪锌矿分布,他形粒状结构;③ 呈条带状构造产出的闪锌矿+磁黄铁矿等,以细粒他形粒状结构为特征	围岩蚀变主要矿物有石榴子石、透辉石、方柱石、透闪石等。矿化蚀变可划分为矽卡岩阶段、温矽卡岩阶段、磁铁矿-石英脉阶段、石英-方铅矿-闪锌矿-黄铜矿等多金属硫化物以及石英-碳酸盐阶段,即两期 5 个阶段;成矿温度 126~240℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 和密度分别为 2.07%~9.47%, 0.89~0.92 g/cm ³ , 压力为 33.88~59.72 MPa (张勇等,2012)	岩浆热液接触交代矽卡岩型

样品的化学处理流程和质谱测定技术详见文献(杜安道等,2001;Shirey et al.,1995;Du et al.,2004;Qi et al.,2010)。模式年龄(t)计算公式如下: $t = [\ln(1 + {}^{187}\text{Os}/{}^{187}\text{Re})]/\lambda$,Re 衰变常数值采用 $1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Smoliar et al.,1996)。

3 测试结果

辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果见表 2。天宝山多金属矿田 9 件样品均为辉钼矿石英脉。 $w(\text{Re})$ 变化于 $0.353 \sim 9.306 \mu\text{g/g}$ 之间, $w({}^{187}\text{Re})$ 变化于 $222.1 \sim 5825 \text{ ng/g}$ 之间, $w({}^{187}\text{Os})$ 变化于 $0.647 \sim$

18.86 ng/g 之间。得到模式年龄为 $174.7 \sim 200.3 \text{ Ma}$,加权平均值年龄为 $(194.6 \pm 3.9) \text{ Ma}$ 。采用 ISOPLLOT 软件(2.06),将 9 组数据进行等时线拟合计算,得到等时线年龄为 $(196.6 \pm 2.5) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.94, $n = 9$)(图 3)。

上述辉钼矿的 Re-Os 同位素数据显示,TDF-018 与其他样品相差较大,可能与样品的代表性有关。笔者认为可能是几组样品的地球化学特征有明显的差别,或所采辉钼矿样品颗粒大小不一,有的样品以边部为主、有的样品以中心为主,不同环境结晶的辉钼矿,其同位素比值显然不同,因而相差较大。

表 2 天宝山多金属矿田辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Re-Os isotopic analyses of molybdenite from the Tianbaoshan polymetallic orefield

矿石名称	样品编号	$w(\text{Re})/(\mu\text{g/g})$		$w({}^{187}\text{Re})/(\text{ng/g})$		$w({}^{187}\text{Os})/(\text{ng/g})$		模式年龄/Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
辉钼矿 石英脉	TDF-3a	2.605	0.700	1631	44	5.28	0.07	194.9	2.7
	TDF-3b	3.295	0.960	2063	60	6.53	0.22	190.3	6.4
	TDF-4-1a	5.682	0.185	3557	116	11.80	0.14	199.5	2.4
	TDF-4-1b	5.372	0.169	3363	106	11.02	0.16	197.1	2.8
	TDF-4-2a	5.220	0.221	3267	138	10.83	0.09	199.3	1.7
	TDF-4-2b	5.424	0.118	3396	74	11.31	0.36	200.3	6.3
	TDF-20b	9.306	0.226	5825	142	18.86	0.20	194.7	2.1
	TDF-21	3.141	0.760	1966	48	6.26	0.04	191.5	1.3
	TDF-018	0.353	0.008	222.1	4.9	0.647	0.007	174.7	4.5

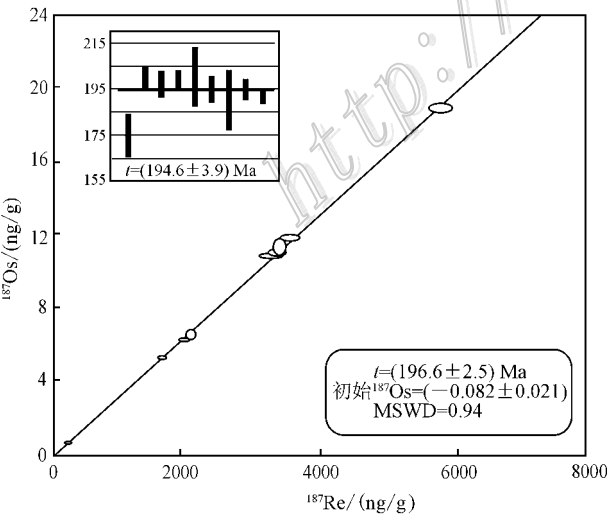


图 3 天宝山多金属矿田辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图

Fig. 3 Re-Os isotopic isochron diagram of molybdenite from the Tianbaoshan polymetallic orefield

4 讨论

4.1 天宝山多金属矿田成矿时代

天宝山矿田的成矿年龄,前人已进行了较多的同位素测年工作,方文昌(1992)测得头道沟花岗闪长岩体黑云母 K-Ar 年龄为 280 Ma ,东山石英二长闪长岩体角闪石 K-Ar 年龄为 220.1 Ma ,鸡冠山二长花岗斑岩体全岩 K-Ar 年龄为 175 Ma ;彭玉鲸等(2009)报道与成矿有关围岩的头道沟花岗闪长岩岩体全岩 Rb-Sr 年龄为 245 Ma ,东风北山含矿岩体 K-Ar 年龄为 $185 \sim 175 \text{ Ma}$,新兴隐爆角砾岩岩体白云母 K-Ar 年龄为 224 Ma ,立山英安斑岩岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 205 Ma ,东风海相火山岩 Pb-Pb 同位素年龄为 $287 \sim 258 \text{ Ma}$,头道沟角砾岩筒型铅锌银(铜)矿 K-Ar 年龄 183 Ma ,矿石铅同位素模式

年龄为 227 Ma 张勇等(2011)利用含闪锌矿石英脉进行了石英矿物流体包裹体的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光探针定年,获得的成矿年龄为 $(179 \pm 11) \text{ Ma}$ 。但鉴于不同阶段流体包裹体常常共存或地壳流体、大气组分的混染,可能会影响成矿时代的精确限定,而利用锆石 U-Pb 法获得东风矿床花岗闪长岩的年龄为 $(277.3 \pm 1.1) \text{ Ma}$ 和 $(273.6 \pm 2.9) \text{ Ma}$ 、新兴矿床花岗闪长岩的年龄为 $(277.4 \pm 1.0) \text{ Ma}$ (待发表)。以上所得到的成矿年龄多根据与成矿相关的岩体成岩年龄进行间接推断。

本文测得 9 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素等时线年龄为 $(196.6 \pm 2.5) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.94, $n = 9$),与加权平均值基本一致(图 3),说明等时线年龄可靠。由等时线获得 ^{187}Os 初始值为 (-0.082 ± 0.021) ,初始值接近于 0,说明辉钼矿形成时几乎不含 ^{187}Os ,辉钼矿中的 ^{187}Os 由 ^{187}Re 衰变而成,满足 Re-Os 同位素体系模式年龄计算条件(蒋少涌等, 2000)。虽然 TDF-018 样品的 Re-Os 含量明显低于其他样品,但并不影响等时线的线性关系,该等时线年龄为天宝山多金属矿田提供了一个准确的时限,可以代表真实的成矿年龄。

3 个矿床中矿石铅的单阶段模式年龄(t_z)变化于 189~196 Ma,平均 193 Ma(另文详述)。虽然铅同位素单阶段模式年龄一般不具有成矿时代的意义,但在某些特殊情况下,模式年龄可以代表铅同位素脱离体系的时代(费光春等, 2011)。本次测得的矿石铅模式年龄与矿田辉钼矿等时线年龄在误差范围内一致,推测矿化应为同一时代,且成矿物质来源相同。

目前已经获得一批吉林省中东部早侏罗世钼矿床的成岩成矿年龄数据:大冰湖沟钼矿区不等粒花岗闪长岩中辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为 $(192 \pm 3) \text{ Ma}$ (邸新等, 2011);三岔钼矿区二长花岗斑岩 K-Ar 年龄为 195 Ma(刘兴桥等, 2010);大石河钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 $(186 \pm 3) \text{ Ma}$ (邸新等, 2011)。综合分析认为,天宝山多金属矿田属早侏罗世吉林中东部大规模成矿事件的产物。Kendrick 等(2001)和 Selby 等(2001)研究提出,多数矿床是多期岩浆和热液事件作用的结果,成矿可能发生于围岩侵入体侵位后的几个或十几个百万年,矿田内的成矿与所测成岩时差相对较大。因此,推测可能还存

在一期与成矿关系更为密切的岩浆流体活动。

4.2 成矿物质来源探讨

Re 和 Os 为亲铁、亲硫的耐熔元素,相对而言,铼是一种高度相容元素,而钨是一种中等程度不相容元素。在地幔熔融过程中,铼倾向于富集在地幔残留相中,而钨倾向于富集在熔浆中,导致地幔与地壳中的 Re/Os 比值发生很大变化。因此,Re-Os 同位素体系不仅可以用来进行年代测定,也可以对岩石的成因和地幔演化过程进行示踪(李杰等, 2005)。可通过金属硫化物矿床辉钼矿的 Re 含量示踪其来源(Mao et al., 1999;李厚民等, 2007;周清, 2011)。周清(2011)对国内外 30 多个不同类型含钼矿床的相关岩体成因与辉钼矿中的 Re 含量变化范围及其相对应的 ^{187}Os 含量进行分析对比,发现明显的规律:幔源成因辉钼矿中 $w(\text{Re})$ 大于 100×10^{-6} ,壳源成因辉钼矿中 $w(\text{Re})$ 平均值在 10×10^{-6} 以下,壳幔混源成因辉钼矿中 $w(\text{Re})$ 介于两者之间,暗示了辉钼矿中 Re 元素可反映相关矿床的物质来源。Mao 等(1999)综合分析中国各种类型钼矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素测试数据得出,从地壳源到壳幔混合源、再到地幔源, $w(\text{Re})$ 接近 1 个数量级差别,从 $n \times 10^{-6} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-4}$ 。

天宝山矿田 $w(\text{Re})$ 为 $0.353 \times 10^{-6} \sim 9.306 \times 10^{-6}$,平均值 4.49×10^{-6} ,指示成矿物质可能来源于壳源,方文昌(1992)研究天宝山矿田矿石、火成岩及围岩铅同位素指出 3 个矿床铅来源一致。另外,孙德有等(2005)研究吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩岩浆,都来源于年轻的基性玄武质下地壳的部分熔融;赵院冬等(2009)研究延边-东宁地区晚三叠世花岗岩 Sr-Nd 同位素特征,指出岩浆源岩可能来自新生地壳的熔融作用。最近的研究表明,吉林省中东部钼矿床成矿物质来源以壳源为主(李立兴等, 2009;汪成辉等, 2009)。综上初步认为,天宝山多金属矿田成矿物质来源为壳源。

4.3 成矿动力学背景

近年来,吉林省中东部山区已探明大、中型钼矿床约 12 座,根据目前高精度的成岩年代学数据(张艳斌, 2002),结合吉林省中东部斑岩成矿年龄(表 3),将吉林省中东部山区钼矿化作用分为早侏罗世(196.6~186 Ma)和中侏罗世(176.9~166.9 Ma)两个阶段,以中侏罗世钼成矿作用最为发育(图 4)。

表 3 研究区主要钼矿床年龄一览表

Table 3 Ages of ore-bearing Mo deposits in the study area

矿床名称	年龄/Ma	测试方法	测试矿物	资料来源
东风	196.6 ± 2.5	Re-Os	辉钼矿	本文
三岔	195	K-Ar	二长花岗斑岩	刘兴桥等,2010
大冰湖沟	192 ± 3	Re-Os	辉钼矿	邸新等,2011
大石河	186 ± 3	Re-Os	辉钼矿	邸新等,2011
季德屯	169	Re-Os	辉钼矿	汪志刚,2012
八道河子	176.9 ± 1.4	Re-Os	辉钼矿	汪志刚,2012
八道河子	177.4 ± 0.59	LA-ICP-MS	花岗斑岩	汪志刚,2012
福安堡	166.9 ± 6.7	Re-Os	辉钼矿	李立兴等,2009
刘生店	168.7 ± 0.71	Re-Os	辉钼矿	待发表
新华龙	171.6 ± 1.6	Re-Os	辉钼矿	待发表
大黑山	168.2 ± 3.2	Re-Os	辉钼矿	待发表
大黑山	170 ± 3	SHRIMP U-Pb	花岗闪长斑岩(含矿)	葛文春等,2007
石人沟	169.5 ± 1.1	/	/	Zeng et al.,2012

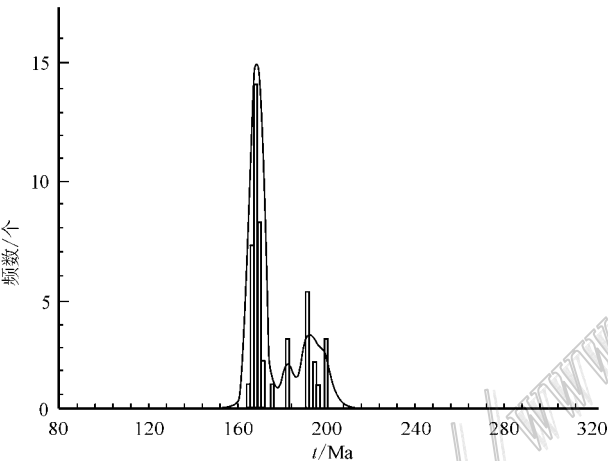


图 4 辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄直方图

Fig. 4 Histogram of Re-Os isotopic model ages

区域上东北地区该期岩浆和成矿作用发育,在兴蒙造山带东端的大兴安岭地区、小兴安岭-张广才岭地区、延边地区及辽东地区发育着大量的侏罗纪花岗岩(孙德有等,2001;张艳斌,2002;苗来成等,2003;Zhang et al.,2004)。然而,对于该期花岗岩的构造背景尚存在分歧:①一些学者认为与太平洋板块体制有关(隋振民等,2007;葛文春等,2007),然而大量的事实表明太平洋板块对欧亚大陆的俯冲作用出现于中-晚侏罗世,鼎盛于晚侏罗世—白垩纪(邵济安等,1999;林强等,1999;张旗等,2001),同时,研究表明吉林省中东部斑岩型钼矿床成矿物质来源主要是古生代变质岩系或陆壳,其次是下地壳,与板块作用有关的岩浆提供成矿物质是极为次要的(石新增等,1998),显然太平洋板块俯冲体制与该期

岩浆及成矿作用并无直接的成因联系;②一些学者认为与古亚洲域内古生代板块消亡产生的冷地幔柱或造山后伸展作用有关(林强等,2004;邵济安等,1999;刘宝山等,2007;李舫等,2010;张炯飞等,2000),然而,东北地区中生代岩浆作用成岩时代上跨度较大,空间上呈带状分布,几乎不存在环状火山岩带,这一点使用地幔柱模式很难解释(张吉衡,2009);③一些学者提出了华北与西伯利亚南北两大板块碰撞后伸展作用有关的观点(韩振哲等,2009;2010;代军治等,2006;陶继雄等,2003;张春艳等,2007)。毛景文等(2000;2005)通过对华北中生代大规模成矿作用的研究,认为大规模成矿作用通常发育于后碰撞造山环境而不是同碰撞造山期间。同时,华北板块北缘出现的辉长辉绿岩(肖家营子)及似斑状花岗岩、花岗闪长(斑)岩和与之关系密切的 Mo、Pb、Zn、Au、Ag 矿床,正是对此次事件的响应(代军治等,2006)。综合上述区域成矿地质背景,笔者认为天宝山多金属矿田为华北板块与西伯利亚板块挤压后应力松弛期诱发深部热流与物质的大面积上升,导致强烈岩浆活动,伴随着大规模岩浆活动发生成矿作用。

5 结 论

(1) 通过对天宝山多金属矿田 9 件辉钼矿 Re-Os 同位素测试分析, $w(\text{Re})$ 为 $0.353 \sim 9.306 \mu\text{g/g}$,模式年龄为 $174.7 \sim 200.3 \text{ Ma}$,加权平均值年龄为 $(194.6 \pm 3.9) \text{ Ma}$,等时线年龄为 $(196.6 \pm 2.5) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.94, n=9$),表明天宝山多金属矿田形成

于早侏罗世,初步认为其成矿物质来源为壳源,成矿动力学背景与华北板块和西伯利亚板块碰撞拼合后伸展环境有关。

(2) 结合研究区已有资料,吉林省中东部山区钼成矿作用至少有两期:早侏罗世(196.6~186 Ma)和中侏罗世(176.9~166.9 Ma),以中侏罗世最为发育。

志 谢 感谢中国科学院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室和国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室工作人员对本次实验的大力支持和帮助,两位匿名审稿人对本文提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心感谢!

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): 598-621.
- 邸 新,毕小刚,贾海明,李 栋. 2011. 蛟河地区前进岩体锆石 U-Pb 年龄及其与吉中-延边地区钼矿成矿作用的关系[J]. 吉林地质, 30(4): 25-28.
- 杜安道,赵敦敏,王淑贤,孙德忠,刘敦一. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钼同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.
- 方文昌. 1992. 吉林省花岗岩类及其成矿作用[M]. 长春:吉林科学技术出版社. 1-271.
- 费光春,多 吉,温春齐,阳正熙,龙训荣,周 雄. 2011. 西藏洞中拉铅锌矿床 S, Pb, Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. 矿物岩石, 31(4): 52-57.
- 葛文春,吴福元,周长勇,张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu-Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. 科学通报, 52(20): 2407-2417.
- 韩振哲,赵海玲,王盘喜,杨 霄,牛延宏,赵寒冬. 2009. 黑龙江伊春地区晚三叠世—早侏罗世铝质 A 型正长-碱长花岗岩地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(2): 97-108.
- 韩振哲,赵海玲,李娟娟,冷昌恩,吕 军,李文龙. 2010. 小兴安岭南伊春一带早中生代花岗岩与多金属成矿作用[J]. 中国地质, 37(1): 74-87.
- 蒋少涌,杨竞红,赵葵东,于际民. 2000. 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), 36(6): 669-677.
- 金尚林,李昌根. 1984. 天宝山区 $\delta^{34}\text{S-d}$ 相关图解及意义[J]. 地质与勘探, 6(4): 23-28.
- 李宝树,李鹤年. 1991. 多金属矿床的复式成因——吉林天宝山矿床成因讨论[J]. 长春地质学院学报, 21(2): 175-182.
- 李超文,郭 锋,范蔚茗,高晓峰. 2010. 延吉地区晚中生代火山岩的 Ar-Ar 年代学格架及其大地构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 37(3): 319-330.
- 李厚民,叶会寿,毛景文,王登红,陈毓川,屈文俊,杜安道. 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钼定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 417-424.
- 李立兴,松权衡,王登红,王成辉,屈文俊,汪志刚,毕守业,于 城. 2009. 吉林福安堡钼矿中辉钼矿铼-钼同位素定年及成矿作用探讨[J]. 岩矿测试, 28(3): 283-287.
- 李 杰,许继峰,梁细荣. 2005. Re-Os 同位素分析测试技术进展[J]. 质谱学报, 26(3): 175-181.
- 李 舫,王 涛,童 英. 2010. 中亚造山系中南段早中生代花岗岩类时空分布特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 642-662.
- 林 强,葛文春,孙德有,吴福元. 1999. 东北亚中生代火山岩的地球动力学意义[J]. 地球物理学报, 42(增刊): 75-84.
- 林 强,葛文春,吴福元,孙德有,曹 林. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. 岩石学报, 20(3): 403-412.
- 刘宝山,任凤和,李仰春,赵焕力. 2007. 伊春地区晚印支期 I 型花岗岩带特征及其构造背景[J]. 地质与勘探, 43(1): 74-78.
- 刘劲鸿,松权衡. 2000. 吉林省延边地区天宝山-天桥岭多金属成矿带的成矿物质来源[J]. 吉林地质, 19(3): 26-34.
- 刘兴桥,彭玉鲸,殷长建,齐成栋,周晓东. 2010. 吉林省晚三叠世—早白垩世花岗岩类三大成因构造类型及其地质找矿意义[J]. 吉林地质, 29(1): 1-4.
- 毛景文,王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探[J]. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 289-296.
- 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): 169-188.
- 苗来成,范蔚茗,张福勤,刘敦一,简 平,施光海,陶 华,石玉若. 2003. 小兴安岭西北部新开岭-科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. 科学通报, 48(22): 2315-2323.
- 彭玉鲸,翟玉春,张鹤鹤. 2009. 吉林省晚印支期—燕山期成矿事件年谱的拟建及特征[J]. 吉林地质, 28(3): 2-14.
- 邵济安,张履桥,牟保磊. 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘, 6(4): 339-346.
- 石新增,李树田,时友东,王忠恒,于新民. 1998. 二合屯砂板岩的地质特征及形成时代[J]. 吉林地质, 17(4): 1-10.
- 宋 贵. 1984. 吉林省天宝山新兴角砾岩筒型铅锌矿床地质特征及成矿条件[J]. 吉林地质, 4: 47-53.
- 隋振民,葛文春,吴福元,张吉衡,徐学纯,程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 23(2): 461-480.
- 孙德有,吴福元,林 强,路孝平. 2001. 张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用[J]. 岩石学报, 17(2): 227-235.
- 孙德有,吴福元,高 山,路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏

- 罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. 地质前缘, 12(2): 263-275.
- 孙景贵, 邢树文, 郑庆道, 黄永卫, 殷嘉飞, 刘洪文, 王长峰, 葛正林, 李光辉, 陈军强. 2006. 中国东北部陆缘有色、贵金属矿床的地质、地球化学[M]. 吉林大学出版社. 1-128.
- 陶继雄, 胡凤翔, 陈志勇. 2003. 华北陆块北缘印支期 S 型花岗岩带特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 22(2): 112-118.
- 汪志刚. 2012. 吉林东部中生代内生金属矿床成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 导师: 孙丰月. 长春: 吉林大学. 1-178.
- 王成辉, 松权衡, 王登红, 李立兴, 于 城, 汪志刚, 屈文俊, 杜安道, 应立娟. 2009. 吉林大黑山超大型钼矿辉钼矿-钼同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 269-273.
- 徐仁杰, 崔贤实, 王玉宝, 时俊峰. 2010. 延边地区大型金及有色金属矿床成矿时代及矿源[J]. 吉林地质, 29(3): 9-11.
- 张春艳, 张兴洲, 邱殿明. 2007. 延边地区青龙村群斜长角闪岩中锆石 U-Pb 同位素年龄及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(4): 672-677.
- 张吉衡. 2009. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究[D]. 导师: 高山. 武汉: 中国地质大学. 1-105.
- 张炯飞, 权 恒, 武 广, 祝洪臣. 2000. 东北地区中生代火山岩形成的构造环境[J]. 贵金属地质, 9(1): 33-38.
- 张 旗, 赵太平, 王 焰, 王元龙. 2001. 中国东部燕山期岩浆活动的问题[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 273-292.
- 张艳斌. 2002. 延边地区花岗岩岩浆活动的同位素地质年代学格架(博士论文)[D]. 导师: 吴福元. 长春: 吉林大学. 1-122.
- 张 勇, 孙景贵, 松权衡, 赵 志, 陈 冬, 门兰静, 白令安, 韩世炯. 2011. 延边天宝山多金属矿床的矿物流体包裹体激光探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年及其地质意义[J]. 矿物岩石, 31(2): 42-47.
- 张 勇, 孙景贵, 陈 冬, 邢树文, 松权衡, 赵 志, 赵克强, 白令安, 韩世炯. 2012. 延边地区天宝山多金属矿田的流体特征与成矿模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1665-1675.
- 赵院冬, 迟效国, 车继英, 刘建峰, 赵 芝. 2009. 延边-东宁地区晚三叠世花岗岩地球化学特征及其大地构造背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 425-434.
- 周 清. 2011. 德兴斑岩铜矿含矿斑岩成因及成矿机制(博士学位论文)[D]. 导师: 姜耀辉. 南京: 南京大学. 1-99.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Markey R, Stein H, Morgan J W and Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 28: 41-52.
- Kendrick M A, Burgess R, Pattick R A D and Turner G. 2001. Halogen and Ar-Ar age determination of inclusions within quartz veins from porphyry copper deposits using complementary noble gas extraction techniques[J]. Chemical Geology, 117: 351-370.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 1815-1818.
- Qi L, Zhou M F, Gao J F and Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 25: 585-589.
- Selby D and Creaser R A. 2001. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia, Canada[J]. Econ. Geol., 96: 197-204.
- Selby D and Creaser R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(19): 3897-3908.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis [J]. Analytical chemistry, 67: 2136-2141.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, II A, IV A, and IVB iron meteorites [J]. Science, 271: 1099-1102.
- Zeng Q D, Liu J M, Chu S X, Wang Y B, Sun Y, Duan X X and Zhou L L. 2012. Mesozoic molybdenum deposits in the east Xingmeng orogenic belt, northeast China: Characteristics and tectonic setting [J]. International Geology Review, 54(16): 1843-1869.
- Zhang Y B, Wu F Y, Wilde S A, Zhai M G, Lu X P and Sun D Y. 2004. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of 'Early Paleozoic' granitoids at Yanbian, Jilin Province, northeast China [J]. Island Arc, 13: 484-505.