

刘明军, 李厚民, 于仕祥, 等. 辽宁鞍山地区铁矿床黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1821-1832.
Liu Mingjun, Li Houmin, Yu Shixiang, et al. Re-Os isotopic dating of pyrite and molybdenite from the iron deposits in Anshan-Benxi area of Liaoning Province and its geological significances[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1821-1832(in Chinese with English abstract).

辽宁鞍山地区铁矿床黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义

刘明军^{1,2} 李厚民² 于仕祥¹ 许宗宪¹ 姚良德¹ 文 屹¹ 赵洪振¹

(1. 辽宁省冶金地质勘查局地质勘查研究院, 辽宁鞍山 114038;
2. 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要: 本文利用 Re-Os 同位素体系 (ICP-MS 方法) 对 1 件辉钼矿和 10 件黄铁矿样品进行定年。1 件辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为 (2376 ± 37) Ma, 10 件黄铁矿获得了 3 组 Re-Os 年龄: ① (2567 ± 36) Ma~ (2540 ± 37) Ma (模式年龄); ② (2237 ± 112) Ma (模式年龄); ③ (1572 ± 140) Ma (等时线年龄)。 (2376 ± 37) Ma 的辉钼矿形成于古元古代, 是目前中国已知最老的辉钼矿年龄之一, 其成矿物质来自地壳, (2237 ± 112) Ma 的黄铁矿属于热液成因, 其成矿物质来自地壳, (2376 ± 37) Ma~ (2237 ± 112) Ma 的 Re-Os 年龄代表了一次重要的热液改造事件; (2567 ± 36) Ma~ (2540 ± 37) Ma 的黄铁矿是原始沉积形成的, 是目前中国已知最老的黄铁矿年龄, 该年龄代表了 2.5 Ga 形成 BIF 的地质事件; (1572 ± 140) Ma 的黄铁矿形成于中元古代, 具有明显的壳源特征, 该年龄代表了一次较晚期的热液改造事件。这些年龄为确定鞍山地区铁矿的热液活动时间提供了新的重要证据, 对深入认识区域成矿规律和探讨地质构造演化具有重要意义。

关键词: Re-Os 同位素测年; 黄铁矿; 辉钼矿; 条带状铁建造; 鞍山地区

中图分类号: P618.31; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)06-1821-12

1 引 言

前寒武纪条带状铁建造 (简称 BIFs) 是国内外最重要的铁矿资源类型, 资源储量和开采量均居世界首位。中国的 BIF 称为沉积变质型铁矿, 广泛分布于鞍山—本溪、冀东、鲁西、五台—吕梁、内蒙古固阳、河南舞阳及安徽霍邱等地区, 其中鞍山—本溪地区是中国最大的沉积变质型铁矿集区, 查明的铁矿资源储量达 125 亿 t, 占全国的 24% 左右^[1-2]。条带状铁建造多形成于新太古代, 围岩以变质火山岩为主, 经历海相火山沉积作用, 后遭受区域变质作用和多期热液活动形成铁矿床。前人对华北克拉

通广泛分布的 BIF 开展过大量的研究工作, 尤其在磁铁矿石的成矿年代学方面做过大量的工作^[3-6], 认为华北克拉通 BIF 形成于始太古代到古元古代早期, 但主要为新太古代晚期 (2.50~2.56 Ga), 但是在以往的研究中由于缺乏有效测定热液事件发生年龄的技术手段和方法, 因此对后期改造成矿的时代很少研究。笔者在野外调研时发现, 鞍山地区铁矿床的露头 and 钻孔中含有大量的含黄铁矿磁铁矿石及含辉钼矿石英脉体, 而这些硫化物的形成可能是在几期比较重要的热液事件中形成的, 这些热液事件对磁铁矿石去硅富铁形成富矿具有一定的贡献作用。因此, 本文试图通过对黄铁矿和辉钼矿的

收稿日期: 2014-10-08; 改回日期: 2014-10-31

基金项目: 国家 973 项目 (2012CB416801) 和国土资源部公益性行业科研专项 (200911007-15、201111002) 联合资助。

作者简介: 刘明军, 男, 1985 年生, 工程师, 矿床学专业; E-mail: liumingjun2012@163.com。

Re-Os 同位素测年研究,探讨热事件发生的年龄,并阐述其地质意义。

2 区域地质及主要矿床地质特征

鞍本地区在大地构造上位于华北克拉通东北缘(图1-a),沉积变质型铁矿主要形成于新太古代大陆边缘的火山沉积盆地,主要产于基性火山凝灰岩和中酸性杂砂岩之间的过渡层位和含少量基性火山岩的沉积岩中,岩石遭受了绿片岩相至低角闪岩

相的变质作用^[7-8]。鞍本地区出露的地层主要为太古宙鞍山群,其次还可见元古宙辽河群、古生界和新生界。条带状铁建造主要产出在中、上鞍山群中,大部分分布在鞍山市的西鞍山—大孤山地区、眼前山—齐大山地区、辽阳市的弓长岭地区、本溪市的歪头山—南芬地区等(图1-b)。区内构造活动强烈,主要发育NE向和NNW向2组断裂,包括寒岭断裂、偏岭断裂、汤河沿—南芬断裂、三道岭—陈家岭子断裂、东黄泥岗断裂。其中横贯本区的寒岭

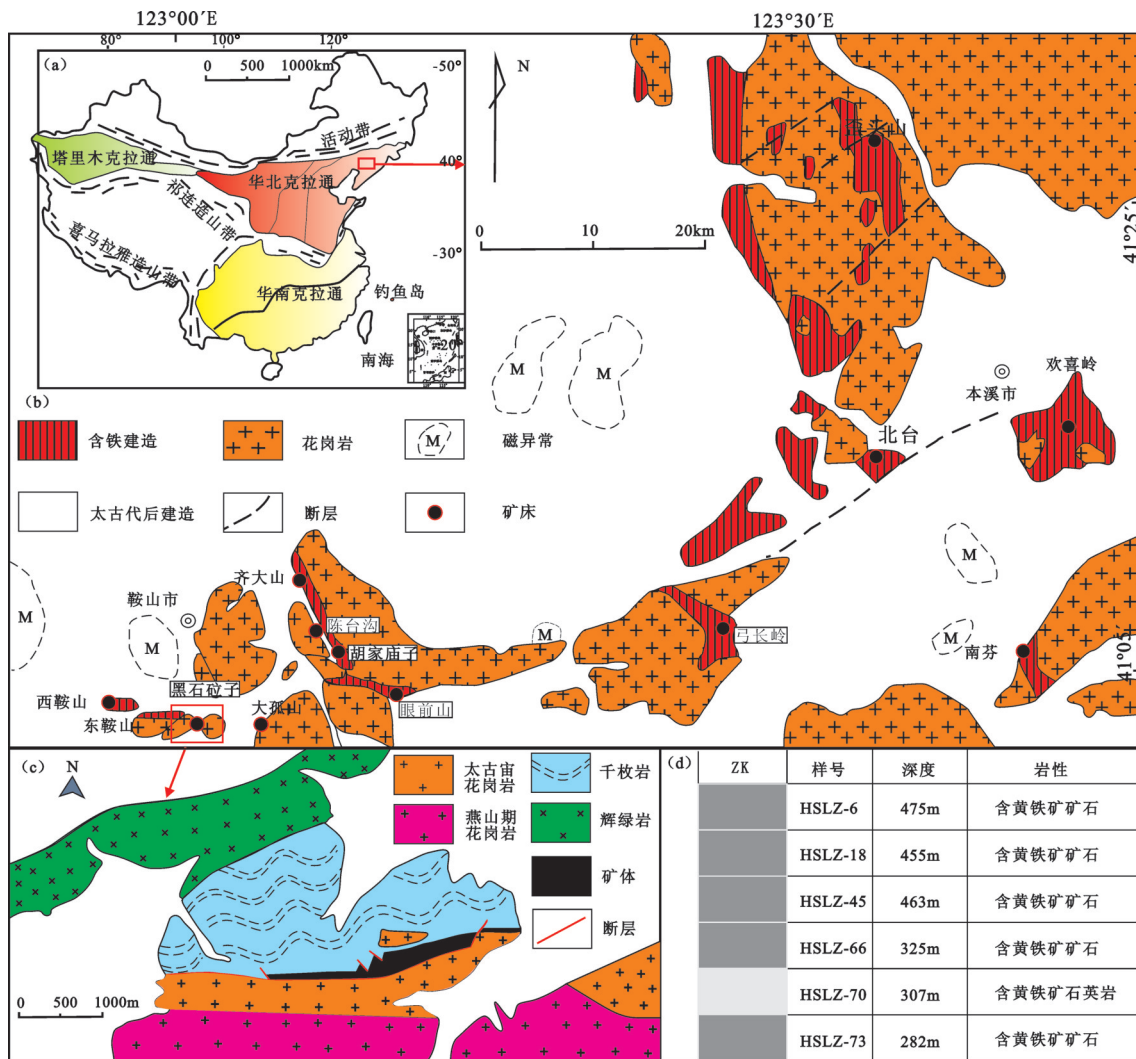


图1 研究区地质简图

a—鞍本地区大地构造位置(据文献[12,13]);b—鞍本地区条带状铁建造与太古宙地质体分布图(据文献[8]);c—黑石砬子地区地质图(据文献[14]);d—黑石砬子BIF型铁矿钻孔柱状图及采样位置

Fig.1 Geological map of the study area

a—Tectonic position of Anshan-Benxi area (after references [12, 13]); b—Distribution of banded iron formations and Archean geological bodies in Anshan-Benxi area, Liaoning Province (modified after reference [8]); c—Geological map of Heishilazi area (modified after reference [14]); d—Column of the drill hole in the Heishilazi BIF-type iron deposit and sampling sites

断裂是郯城—庐江深断裂的分支,断裂带内挤压破碎严重。前人认为鞍本地区太古宙地壳存在过多次构造变形,使铁矿体经历了强烈的叠加改造与复杂的内部变形^[9-10]。区内岩浆岩出露广泛,混合岩化极为发育,形成若干巨大的混合花岗岩体。花岗岩主要有两种,一种是年龄为3.1~3.8 Ga的混合花岗岩,分布广泛;另一种是年龄为2.5 Ga左右的花岗岩^[7],此外还有一些中生代燕山期花岗岩呈小岩株状侵入到辽河群和辉绿岩脉边部。

黑石砬子铁矿床和弓长岭铁矿床是鞍本地区铁矿床的重要组成部分(图1-c)。研究区分别出露地层主要为太古宙鞍山群樱桃园组和茨沟组:樱桃园组由下部千枚岩系、中部条带状磁铁石英岩和上部千枚岩系组成,其中中部条带状磁铁石英岩为该矿区含矿层,主要由磁铁石英岩、假象赤铁石英岩、菱铁磁铁石英岩、绿泥石英片岩组成。茨沟组由底部角闪岩、下含铁岩系、K层和上含铁岩系组成,下含铁岩系主要由斜长角闪岩及Fe1、Fe2铁矿层组成;K层主要由黑云变粒岩和Fe3铁矿层夹层组成;上含铁岩系主要由斜长角闪岩、蚀变岩及Fe4、Fe5、Fe6铁矿层组成,其中Fe6铁矿层有大量的富铁矿产出。富矿顶板产出白云质大理岩和大量蚀变岩。

研究区主要出露太古宙花岗岩以及少量的燕山期花岗岩以及辉绿岩(图1-c)。太古宙花岗岩为3.0 Ga左右形成于条带状磁铁石英岩之前的弓长岭混合花岗岩^[7],遭受了强烈的区域变质作用,呈片麻状,具有较强的糜棱岩化^[11]。

研究区内构造作用比较发育,黑石砬子铁矿床的北东东向斜交正断层在地表断续出露,该断层沿矿体走向将矿体北部切断,使矿体北部下降并被辽河群浪子山组地层覆盖,形成隐伏矿体。弓长岭铁矿床主要受控于偏岭断裂和寒岭断裂。

研究区产出的矿石主要为磁铁石英岩。组成矿石的金属矿物主要有磁铁矿、假象赤铁矿及黄铁矿、菱铁矿、镜铁矿及微量黄铜矿;非金属矿物主要有石英、透闪石及方解石、白云石、电气石、绿泥石等。矿石经历了多期次的变质变形作用的改造。矿石多呈自形半自形结构和他形粒状结构、残斑碎裂结构、交代假象及交代残余结构。矿石以条带状构造为主,矿石的TFe品位多在20%~35%。

3 样品采集与测试

本次用于Re-Os同位素测年的11件样品中有1件为辉钼矿样品,10件为黄铁矿样品。辉钼矿样品采自弓长岭铁矿,样品为含辉钼矿石英脉。10件黄铁矿样品中6件采自黑石砬子铁矿的钻孔,其中5件为含黄铁矿的矿石(图2-a),1件为含黄铁矿石英岩(图2-b);2件采自眼前山铁矿,样品为含黄铁矿矿石;1件采自陈台沟铁矿的钻孔,样品为含黄铁矿的矿石;1件采自胡家庙子铁矿,样品为含黄铁矿的矿石。具体样品特征和采样地点详见表1。含黄铁矿的矿石样品中均可见较多的硫化物,主要是黄铁矿。黄铁矿呈块状、浸染状,中细粒结构,呈半自形—自形、呈网脉状或斑点状产出,大部分颗粒较大,晶形较好,分布于磁铁矿和其他脉石矿物之间,可见明显的穿插交代现象,可能为晚期的热液作用产物。其中金属矿物主要为磁铁矿和黄铁矿,非金属矿物为石英。选取新鲜的辉钼矿和黄铁矿样品用于Re-Os同位素测年分析,将样品破碎至40~60目,清洗、干燥后在双目镜下挑选单矿物黄铁矿,纯度达99%以上。辉钼矿和黄铁矿Re-Os同位素组成分析工作由国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室完成,样品用TJA X-Series ICP-MS完成测



图2 岩矿石手标本照片(a—含黄铁矿石英岩;b—含黄铁矿磁铁石英岩)

Fig.2 Hand specimens of iron ores and rocks

表1 黄铁矿和辉钼矿样品特征

Table 1 Characteristics of pyrite and molybdenite samples

序号	样品编号	采样矿区	样品名称	取样深度及采样位置	测试工作	测试方法
1	HSLZ-6	黑石砬子	黄铁矿	475m 含黄铁矿的矿石(钻孔)	Re-Os 测年	ICP-MS
2	HSLZ-18	黑石砬子	黄铁矿	455m 含黄铁矿的矿石(钻孔)	Re-Os 测年	ICP-MS
3	HSLZ-45	黑石砬子	黄铁矿	363m 含黄铁矿的矿石(钻孔)	Re-Os 测年	ICP-MS
4	HSLZ-66	黑石砬子	黄铁矿	325m 含黄铁矿的矿石(钻孔)	Re-Os 测年	ICP-MS
5	HSLZ-70	黑石砬子	黄铁矿	307m 含黄铁矿石英岩(钻孔)	Re-Os 测年	ICP-MS
6	HSLZ-73	黑石砬子	黄铁矿	282m 含黄铁矿的矿石(钻孔)	Re-Os 测年	ICP-MS
7	YQS-4	眼前山	黄铁矿	含黄铁矿的矿石(露头)	Re-Os 测年	ICP-MS
8	YQS-8	眼前山	黄铁矿	含黄铁矿的矿石(露头)	Re-Os 测年	ICP-MS
9	CTG-38	陈台沟	黄铁矿	含黄铁矿的矿石(钻孔)	Re-Os 测年	ICP-MS
10	H11-18	胡家庙子	黄铁矿	含黄铁矿的矿石(露头)	Re-Os 测年	ICP-MS
11	ZC-2	弓长岭	辉钼矿	含辉钼矿石英脉(露头)	Re-Os 测年	ICP-MS

试。具体的原理和详细分析方法参见杜安道等^[15-16]、Du A D等^[17]、屈文俊等^[18]文献。

4 分析结果

Re 和 Os 的含量以及 Os 同位素比值经扣除空白后列于表 2。其中 ^{187}Os 为总 ^{187}Os ，计算时 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的误差指其总误差，置信度为 95%。由表 2 分析数据可知，7 件黄铁矿样品的 $\text{Re} = 0.3424\sim 18.27 \text{ ng/g}$ ， $\text{Os}_{\text{普}} = 0.0024\sim 0.3496 \text{ ng/g}$ ， $^{187}\text{Os} = 0.0055\sim 0.4673 \text{ ng/g}$ ， $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 为 76.52~2718， $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 2.593~74.98。从测试数据来看，Re、Os 含量大部分都很低，但是 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的值都比较大，与 Arne 等^[19]和 Stein 等^[20]提出的

低含量高放射成因 Os(LLHR)硫化物相似。

黑石砬子铁矿的 4 件样品 HSLZ-6、HSLZ-18、HSLZ-45、HSLZ-66 的 $\text{Re} = 0.5725\sim 18.23 \text{ ng/g}$ ， $\text{Os}_{\text{普}} = 0.0173\sim 0.3496 \text{ ng/g}$ ， $^{187}\text{Os} = 0.0221\sim 0.4673 \text{ ng/g}$ ， $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 为 76.52~2718， $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 4.702~74.98 (表 2)，采用 ISOPLOT 程序^[21]作出 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}-^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等时线图(图 3)，得到黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄为 $(1572 \pm 140) \text{ Ma}$ ，但是平均权重方差较大， $\text{MSWD} = 164$ ，可能是由于黄铁矿 Re、Os 含量低，已接近测定值下限，所以测得的等时线年龄结果误差较大，此外也可能与 ICP-MS 的精度较低有关。

表 2 中样品 YQS-8、CTG-38、H11-18 由于来自不同的铁矿，故没有与黑石砬子 4 件样品拟合出

表 2 鞍本地区铁矿床黄铁矿的 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Re-Os isotopic data for pyrite from the An-Ben area iron deposits

样品名称	编号	原样名	样重/g	$\omega(\text{Re})/10^{-9}$		$\omega(\text{普Os})/10^{-9}$		$\omega(^{187}\text{Os})/10^{-9}$		$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	
				测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	比值	2σ	比值	2σ
黄铁矿	110817-1	HSLZ-6	0.40159	9.752	0.031	0.0173	0.000	0.1691	0.0024	2718	44	74.98	1.60
黄铁矿	110817-2	HSLZ-18	0.40008	18.27	0.06	0.3093	0.003	0.4673	0.0051	284.3	2.9	11.57	0.17
黄铁矿	110817-3	HSLZ-45	0.40145	0.5725	0.0030	0.0360	0.000	0.0221	0.0003	76.52	0.85	4.702	0.073
黄铁矿	110817-4	HSLZ-66	0.400	14.61	0.05	0.3496	0.001	0.3510	0.0014	201.2	0.9	7.692	0.040
黄铁矿	110817-6	YQS-8	0.40151	1.849	0.006	0.0115	0.000	0.0655	0.0006	771.7	7.0	43.49	0.52
黄铁矿	110817-8	CTG-38	0.360	0.3424	0.0044	0.0024	0.000	0.0055	0.0001	698.0	29.0	17.93	0.76
黄铁矿	110817-9	H11-18	0.374	1.094	0.012	0.0263	0.000	0.0101	0.0001	200.2	2.5	2.953	0.027

注：由于上述样品的普通 Os 相对含量较低，能够直接测得模式年龄，为了更清晰直观的表达，故与表 2 分开叙述。

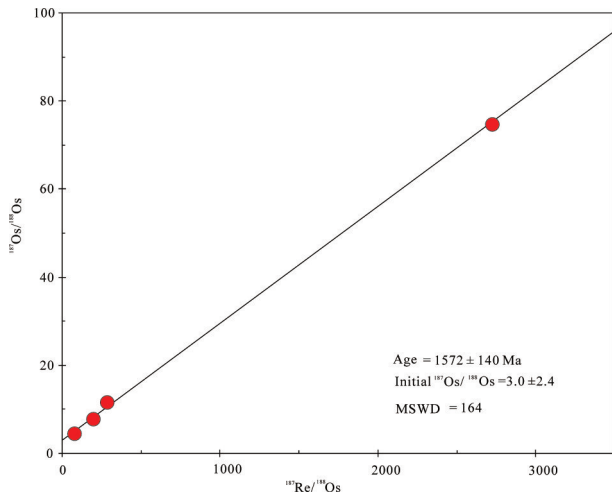


图3 黑石砬子铁矿床黄铁矿 Re-Os 等时线年龄
Fig.3 Pyrite Re-Os isochron of the Heishilazi iron deposit

等时线年龄,这3件样品的 $Re = 0.3424\sim 1.849\text{ ng/g}$, $Os_{\text{普}} = 0.0024\sim 0.0263\text{ ng/g}$, $^{187}Os = 0.0055\sim 0.0655\text{ ng/g}$, $^{187}Re/^{188}Os$ 为 $200.2\sim 771.7$, $^{187}Os/^{188}Os$ 为 $2.953\sim 43.49$, 其中 Re 、 $Os_{\text{普}}$ 、 ^{187}Os 的含量整体上要小于表中4件黑石砬子样品的 Re 、 $Os_{\text{普}}$ 、 ^{187}Os 的含量,但 $^{187}Re/^{188}Os$ 和 $^{187}Os/^{188}Os$ 的值均在这些样品的 $^{187}Re/^{188}Os$ 和 $^{187}Os/^{188}Os$ 值的范围内。

由于样品 HSLZ-70、HSLZ-73、YQS-4、ZC-2 的普通 Os 相对含量较低,能够直接测得模式年龄,为了更清晰直观的表达,故与表2分开叙述,具体测试数据详见表3。HSLZ-70 的模式年龄为 $(2567\pm 36)\text{ Ma}$, HSLZ-73 的模式年龄为 $(2540\pm 37)\text{ Ma}$, YQS-4 的模式年龄为 $(2237\pm 112)\text{ Ma}$ 、ZC-2 的模式年龄为 $(2376\pm 37)\text{ Ma}$ 。在误差范围内 YQS-4 和 ZC-2 的模式年龄基本一致,都为 2.3 Ga 左右。从分析数据可知,黄铁矿样品 HSLZ-70、HSLZ-73、YQS-4 的 $Re = 2.572\sim 26.735\text{ ng/g}$, $^{187}Re = 1.616\sim 16.803\text{ ng/g}$, $^{187}Os = 0.0614\sim 0.7264\text{ ng/g}$, 样品都在

一个数量级内波动,变化不大。辉钼矿样品 ZC-2 的 Re 为 21398 ng/g , ^{187}Re 为 13449 ng/g , $^{187}Os = 543.1\text{ ng/g}$ 。

以上实验流程由 HLP(黄龙铺辉钼矿)监控,所有分析结果和年龄数据是可信的^[16]。

5 讨论

5.1 黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 年龄的地质意义

近年来,许多学者对鞍山地区磁铁石英岩的成矿年代学进行了许多研究,主要采用的测年方法为锆石 SHRIMP U-Pb 测年,获得了条带状磁铁石英岩 2.5 Ga 左右的成矿年龄^[3-6],然而鞍山地区的铁矿不同程度地遭受了后期强烈的热液改造作用,例如笔者在鞍山地区各个铁矿床均可发现蚀变岩,尤其是在弓长岭铁矿二矿区还发育有巨量的磁铁矿富矿和大量的蚀变岩^[22],说明富矿与蚀变岩的形成很可能与热液活动具有密切的成因联系。而本次在鞍山地区铁矿采集到的辉钼矿和黄铁矿明显是由后期的热液活动形成的,但是由于以往的研究中缺乏有效限定热液活动年龄的技术手段和方法,对于鞍山地区热液活动的年龄未有报道。

本次研究中黄铁矿和辉钼矿样品测年共获得3组数据年龄即: $2567\sim 2540\text{ Ma}$ (模式年龄)、 $2376\sim 2237\text{ Ma}$ (模式年龄)和 $(1572\pm 140)\text{ Ma}$ (等时线年龄),这些年龄分布范围较宽,从新太古代到中元古代都有分布。具体年龄数据如表4所示:

翟明国^[23]将太古宙华北克拉通的形成划分为5个阶段:①华北克拉通经历了 $> 3.0\text{ Ga}$ 的陆核与微陆块的形成;② $2.9\sim 2.7\text{ Ga}$ 的陆壳增生;③ 2.5 Ga 的岩浆、变质作用与克拉通化;④ $2.3\sim 1.9\text{ Ga}$ 的古元古代活动(造山)带;⑤ 1.8 Ga 的基底隆升与裂谷-非造山岩浆事件等。其中 2.5 Ga 的岩浆、变质作用与克拉通化形成了条带状磁铁石英岩;而 $2.3\sim 1.9\text{ Ga}$

表3 鞍山地区铁矿床黄铁矿和辉钼矿的 Re-Os 同位素测试结果
Table 3 Re-Os isotopic data for pyrite and molybdenite from the An-Ben area iron deposits

样品名称	编号	原样名	样重 (g)	$\omega(Re)/10^{-9}$		$\omega(\text{普}Os)/10^{-9}$		$\omega(^{187}Re)/10^{-9}$		$\omega(^{187}Os)/10^{-9}$		模式年龄/Ma		Re/Os
				测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	
黄铁矿	110330-21	HSLZ-70	0.39900	14.840	0.112	0.1783	0.0020	9.327	0.070	0.4076	0.0036	2567	36	83.23
黄铁矿	110330-22	HSLZ-73	0.40000	26.735	0.237	0.3005	0.0022	16.803	0.149	0.7264	0.0062	2540	37	88.97
黄铁矿	110817-5	YQS-4	0.40044	2.572	0.008	0.0024	0.0003	1.616	0.005	0.0614	0.0030	2237	112	1071.67
辉钼矿	110616-12	ZC-2	0.02997	21398	221	3.537	0.333	13449	139	543.1	4.4	2376	37	6049.76

表4 测年结果
Table 4 Dating data

时代	样品类别及编号	获得年龄结果 / Ma
新太古代	HSLZ-70 (黄铁矿 ⁺) 和 (HSLZ-73)	2567~2540 (模式年龄)
古元古代	YQS-4 (黄铁矿 ⁺) 和 ZC-2 (辉钼矿)	2237~2376 (模式年龄)
中元古代	HSLZ-6 (黄铁矿 ⁺)、HSLZ-18 (黄铁矿 ⁺)、HSLZ-45 (黄铁矿 ⁺) 和 HSLZ-66 (黄铁矿 ⁺)	(1572±140) (等时线年龄)

注: YQS-8, CTG-38 和 H11-18 分别采自三个不同的矿区, 无法拟合等时线年龄也没有测得模式年龄, 这里不参加年龄讨论。

的古元古代活动造山事件和 1.8 Ga 的基底隆升与裂谷-非造山岩浆事件解释为两期变质作用叠加于新太古代末的变质作用之上^[23-24]。

本次研究中 2 件黄铁矿样品得到了 2567 Ma 和 2540 Ma 的模式年龄, 这 2 个年龄与前人获得的 2.5 Ga BIF 的形成年龄比较一致^[3-6]。前人的研究成果表明 2.5 Ga 的构造与变质-岩浆事件是华北最重要的构造事件, 此事件标志着华北微陆块的拼合与克拉通化^[25-28], 即该事件形成了巨量的条带状铁矿。前人在对鞍本地区黄铁矿硫同位素研究的过程中发现了原生、呈自形或半自形细粒分布于贫矿和围岩中的黄铁矿, $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 +0.6%, 具有接近陨硫硫的特点^[29], 而条带状磁铁石英岩属于变质的海底热水沉积岩, 与条带状磁铁石英岩同生的黄铁矿可能与条带状磁铁石英岩同时形成。这样的黄铁矿代表了 2.5 Ga 的岩浆、变质作用与克拉通化形成条带状磁铁石英岩的地质事件^[23-24]。

本次研究中 1 件辉钼矿和 1 件黄铁矿样品分别获得了 2376 Ma 和 2237 Ma 的模式年龄, 2 个年龄在误差范围内一致, 为 2.3 Ga 左右, 落入翟明国^[23]的 2.3~1.9 Ga 古元古代华北克拉通活动造山期, 这一期的变质作用叠加于新太古代末的变质作用之上^[23-24], 对新太古代末形成的磁铁石英岩具有很强烈的改造作用, 很可能通过去硅富铁的作用方式形成磁铁矿富矿^[1-2]。本次研究中辉钼矿的 Re 含量为 21.398×10^{-6} , 与变质流体参与成矿的矿床中辉钼矿的 Re 含量 (20×10^{-6}) 比较接近^[30], 说明鞍本地区的铁矿在 2.3 Ga 左右遭受了一次变质流体的改造作用。2237 Ma 的黄铁矿样品 (YQS-4) 的 Re 和 Os 的含量都较低, 分别为 2.572 ng/g 和 0.0024 ng/g, Re/Os 值为 1071.6, 远远大于幔源成因岩石的 Re/Os 值 (0.02~0.21)^[31], 具有壳源特征。此外由于这件黄铁矿样品

采自比较富的矿石中, 可见黄铁矿穿插交代铁条带和硅条带, 并且磁铁矿有变粗富集的现象, 矿石品位明显高于其他样品。而且与前人在以往的研究中发现的热液成因黄铁矿比较相似^[29], 所以这件黄铁矿也是在 2.3 Ga 左右的热事件过程中形成的。综上所述, 本文获得的 2237~2376 Ma 的 Re-Os 年龄代表了 2.3 Ga 左右的造山热事件发生的时间, 推测这个年龄所代表的热事件对磁铁石英岩具有很强烈的改造作用, 可能与鞍本地区富铁矿的形成有密切的成因联系, 但贡献多大还不能确定, 还有待研究, 但可以限定富矿的成矿时间。

本次研究中 4 件黄铁矿样品获得的 Re-Os 等时线年龄为 (1572±140) Ma, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 4.702~74.98, 明显高于各类地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值 (地幔为 0.105~0.152), 接近地壳的值 3.63^[32-36], 反映了这 4 件样品的成矿物质来源具有壳源特征。从采集的样品来看, 黄铁矿产于条带状磁铁石英岩的硅质条带和铁质条带之间, 可以观察到黄铁矿明显交代铁条带和硅条带, 说明上述黄铁矿为热液成因, 其在形成时间上晚于磁铁石英岩。以上分析说明了上述黄铁矿形成于一次较晚期的热液活动。前人通过研究后发现, 辽南地块和辽北-吉南地块在太古宙可能是两个相互独立的块体, 在古元古代晚期由于造山作用而拼合在一起^[37-39]。这次造山事件波及范围广泛, 不但在辽南地区发生了强烈的造山作用, 这次地质事件同样发生在鞍山-抚顺地区。前人在鞍山盖县地区获得了卧龙泉岩体年龄 ((1848±10) Ma)、矿洞沟岩体年龄 ((1843±23) Ma)、(1863±16) Ma 和虎皮峪岩体后期变质作用年龄 ((1850±10) Ma)^[39], 与在辽南地区获得的年龄一致。这些年龄说明了在 1.8 Ga 左右, 发生了一次强烈的构造热事件。而本文获得的 (1572±140) Ma 的年龄上限为

1.7 Ga,可能与上述 1.8 Ga 的基底隆升与裂谷-非造山岩浆事件的期后热液有关^[20]。这个年龄可能纪录了与此次事件有关的热液活动,但也不排除这是一次更晚期的热液活动。从野外地质现象来看这个年龄所代表的热液活动对磁铁石英岩有一定的改造作用,但并未观察到其改造作用形成的富矿,说明其热液改造作用不强。此次获得的等时线年龄属于尝试性的探索,并不能准确限定热液事件发生的时限,但可以说明在(1572±140)Ma 附近,发生了一次热事件,这个年龄纪录了一次热液改造事件。

在以往的研究中,前人主要是通过磁铁石英岩中的夹层岩石的锆石测年来间接测定磁铁石英岩的成矿年龄^[3-4,6],本次研究通过与磁铁石英岩同生沉积的黄铁矿 Re-Os 测年来测定磁铁石英岩的形成年龄,为测定磁铁石英岩的形成年龄提供了新的依据和方法。黄铁矿和辉钼矿 2.3 Ga 的 Re-Os 年龄代表辽宁鞍本地区的铁矿床经历了一次比较重要的热液活动,这次热液活动对条带状磁铁石英岩具有很强烈的改造作用,为磁铁石英岩去硅富铁形成富矿具有一定的贡献。黄铁矿(1572±140)Ma 的 Re-Os 年龄代表了后期更晚期的热液活动,说明鞍本地区的铁矿经历了多期次多阶段的热液活动。

5.2 黄铁矿和辉钼矿的成矿物质来源

前人研究表明,由于 Re、Os 均具有较高的硫化物熔体/硅酸盐熔体分配系数($D \gg 100$)皆在不混溶硫化物岩浆中富集,所以 Re-Os 同位素体系可以有效的示踪硫化物成矿物质来源^[40-45]。此外,Re 与 Os 在地幔和地壳间具有明显的分馏效应,首先 Re 易于从地幔分配到岩浆液相中,属于不相容元素,而 Os 强烈趋向于保持在地幔中,属于高度相容元素,因此,Re-Os 同位素体系还是成矿过程地壳物质混入程度灵敏的指示剂^[46]。本次研究由表 2 中 7 件样品 HSLZ-6、HSLZ-18、HSLZ-45、HSLZ-66、YQS-8、CTG-38、H11-18 的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 2.953~74.98,明显高于各类地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值(0.105~0.152)^[32-35],而远远高于平均大陆地壳值 3.63^[36](样品 H11-18 的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 2.953,略低于平均大陆地壳值),反映了这 7 件样品的成矿物质来源具有壳源特征。前人在研究中发现黄铁矿 Re-Os 定年时属壳源成因的特征是:非常低的 Os 含量和比较高的 $n(^{187}\text{Re})/n(^{188}\text{Os})$ 值^[19-20],即所谓低含量高放射成因 Os(LLHR)。本文

研究获得的黄铁矿样品, $^{187}\text{Os}=0.0055\sim 0.4673$ ng/g, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 为 76.52~2718,具有铼钨含量低,但 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比较大的特征,与 Arne 等^[19]和 Stein 等^[20]提出的低含量高放射成因 Os(LLHR)硫化物相似。所以上述黄铁矿具有明显的壳源特征。

表 3 中 3 件样品 HSLZ-70、HSLZ-73、YQS-4 的 Re 和 Os 的含量较低,其 Re、Os 比值为 83.23~1071.67,远远高于东格陵兰古近地幔柱环境喷发的苦橄岩的 Re/Os 值 0.02~0.21^[31],这可能反映了上述 3 件样品同样具有明显的壳源特征。

表 3 中样品 ZC-2 为辉钼矿,Re 含量为 21.398×10^{-6} ,Re/Os 值为 6049.76。Mao et al^[47]通过综合对比分析中国各种类型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量后总结认为从地幔到壳幔混源再到地壳,辉钼矿中 Re 含量呈数量级递减下降。因此,辉钼矿中的 Re 含量可以示踪成矿物质来源^[47-49]。Stein et al^[30]认为变质流体参与成矿的矿床中辉钼矿的 Re 含量一般低于 20×10^{-6} 。前人研究发现岭南地区的黄沙坪铅锌钨钼矿床中辉钼矿的 Re 含量为 7.02×10^{-6} ,认为其成矿物质来源自于上地壳^[50],而东秦岭地区的黄龙铺钼矿中辉钼矿的 Re 含量为 200×10^{-6} 以上,认为其成矿物质源自于上地幔^[51],而本次研究中辉钼矿的 Re 含量为 21.398×10^{-6} ,接近于 20×10^{-6} ,结合前人的研究成果,说明本次研究中辉钼矿的成矿物质主要源自于地壳。

5.3 目前中国年龄最老的黄铁矿和辉钼矿

本次研究中 1 件辉钼矿获得了 2376 Ma 的模式年龄(表 5)。在世界范围内,绝大多数钼矿形成于中生代或新生代,少数形成于古生代,元古宙和太古宙的钼矿更是鲜有报道。从前人的研究成果可知,西澳太古宙 Yilgarn 克拉通辉钼矿的年龄为 2760~2620 Ma^[48],巴西 Gameleira Cu-Au-Mo 矿床辉钼矿 Re-Os 年龄为 (2641 ± 14) Ma^[52],印度 Malanjhand 大型斑岩 Cu(Mo)矿床的辉钼矿年龄为 (2490 ± 8) Ma^[53],而中国有关太古宙或元古宙辉钼矿 Re-Os 年龄的报道很少。前人报道过寨凹铜钼矿、龙门店钼矿的辉钼矿 Re-Os 年龄为 (1762 ± 31) Ma、 (1804 ± 12) Ma 和 (2044 ± 13) Ma^[49,54-55]。而魏庆国等^[54]获得的 (2044 ± 13) Ma 辉钼矿 Re-Os 模式年龄在当时来看属于中国报道的最老的辉钼矿 Re-Os 模式年龄。而本文获得的 (2376 ± 37) Ma 的辉钼矿 Re-Os 模式年龄比前人报道的年龄还要老 300 Ma

表5 目前国内已知的成矿年龄较早的黄铁矿
和辉钼矿 Re-Os 年龄

Table 5 Available pyrite and molybdenite Re-Os ages of
earlier mineralization in China

时代	矿床名称	测试对象	年龄/Ma	资料来源
新太古代	鞍山黑石砬子BIF铁矿	黄铁矿	2567	本文
新太古代	鞍山黑石砬子BIF铁矿	黄铁矿	2540	本文
古元古代	鞍山弓长岭BIF铁矿	辉钼矿	2376	本文
古元古代	鞍山黑石砬子BIF铁矿	黄铁矿	2237	本文
古元古代	河南龙门店铜矿	辉钼矿	2044	[54]
中元古代	豫西熊耳山寨凹铜矿	辉钼矿	1700~1800	[49]
中元古代	豫西熊耳山寨凹铜矿	辉钼矿	1762	[53]
早古生代	白云鄂博稀土-铈-铁矿	黄铁矿	439	[55]
晚古生代	安徽铜陵新桥硫化物矿	黄铁矿	319	[56]
中生代	云南哀牢山金矿	黄铁矿	229	[57]

左右,可以证实本次研究获得的(2376±37)Ma的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为目前中国获得的最老的辉钼矿 Re-Os 模式年龄。

近年来,中国学者刘玉龙等^[56]、郭维民等^[57]和石贵勇等^[58]分别在白云鄂博稀土-铈-铁矿床、安徽铜陵新桥硫化物矿床和云南哀牢山金矿床的黄铁矿测年研究中得到了 439 Ma、319 Ma 和 229 Ma 的 Re-Os 同位素年龄,本文在表 4 中列出了这些黄铁矿 Re-Os 年龄,其中这些年龄较新的黄铁矿主要产出在早古生代、晚古生代和中生代,此外还有一些更小的黄铁矿 Re-Os 同位素年龄,这里没有一一列举。本次研究中 3 件黄铁矿样品分别得到了 2567 Ma、2540 Ma、2237 Ma 的模式年龄,要远远大于前人测得的黄铁矿 Re-Os 年龄,可以暂时认为本次获得的黄铁矿 Re-Os 年龄是目前国内已发表的文献中最老的黄铁矿 Re-Os 年龄,属新太古代。

综上所述,本文测定的黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 年龄是目前报道的中国最老的黄铁矿和辉钼矿 Re-Os 年龄。

6 结 论

(1)本次研究中 2 件黄铁矿样品得到了 2567 Ma 和 2540 Ma 的模式年龄是目前中国获得的最老的黄铁矿 Re-Os 年龄。这 2 件黄铁矿样品可能为原生沉积成因;1 件辉钼矿和 1 件黄铁矿样品分别获得了 2376 Ma 和 2237 Ma 的模式年龄,其中辉钼矿获

得的 2376 Ma 为目前中国获得的最老的辉钼矿 Re-Os 模式年龄,2237 Ma 的黄铁矿为热液成因,这一期的热液活动可能对鞍本地区的磁铁石英岩去硅富铁形成富矿具有一定的贡献作用;4 件黄铁矿样品获得的 Re-Os 等时线年龄为(1572±140)Ma,黄铁矿为热液成因,代表了更晚期的热液活动。

(2)本次测试的 10 件黄铁矿样品和 1 件辉钼矿样品都具有明显的壳源特征。

(3)在早中元古代鞍本地区的铁矿经历多期多阶段的热液活动,这些热液活动对磁铁石英岩具有一定的改造作用。

致谢:本文在样品测试过程中得到了国家地质实验测试中心李超等的帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献(references):

- 李厚民,陈毓川,李立兴,等.中国铁矿成矿规律[M].北京:地质出版社,2012:1-246.
Li Houmin, Chen Yuchuan, Li Lixing, et al. Metallogenic Regularity of Iron Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-246 (in Chinese with English abstract).
- 李厚民,刘明军,李立兴,等.辽宁弓长岭矿区大理岩地质地球化学特征及其成矿意义[J].岩石学报,2012,28(11):3497-3512.
Li Houmin, Liu Mingjun, Li Lixing, et al. Geology and geochemistry of the marble in the Gongchangling iron deposit in Liaoning Province and their metallogenic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3497-3512 (in Chinese with English abstract).
- 代堰铨,张连昌,朱明田,等.鞍山陈台沟BIF铁矿与太古代地壳增生:锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素约束[J].岩石学报,2013,29(07):2537-2550.
Dai Yanpei, Zhang Lianchang, Zhu Mingtian, et al. Chentaigou BIF-type iron deposit, Anshan area associated with Archean crustal growth: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(7): 2537-2550 (in Chinese with English abstract).
- 万渝生,董春艳,颀颀强,等.华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J].地质学报,2012,86(9):1447-1478.
Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, et al. Formation ages of early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1447-1478 (in Chinese with English abstract).
- 张连昌,翟明国,万渝生,等.华北克拉通早前寒武纪 BIF 铁矿研究:进展与问题[J].岩石学报,2012,28(11):3431-3445.
Zhang Lianchang, Zhai Mingguo, Wan Yusheng, et al. Study of Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton:

- Progresses and questions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11): 3431–3445 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李延河, 张增杰, 伍家善, 等. 冀东马兰庄条带状硅铁建造的变质时代及地质意义[J]. *矿床地质*, 2011, 30(4): 645–653.
Li Yanhe, Zhang Zengjie, Wu Jiashan, et al. Metamorphic chronology of the BIF in Malanzhuang of eastern Hebei Province and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(4): 645–653 (in Chinese with English abstract).
- [7] 万渝生. 辽宁弓长岭含铁岩系的形成与演化[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1993: 1–99.
Wan Yusheng. The Formation and Evolvement of Ferrous Rock Series of Gongchangling, Liaoning Province[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1993: 1–99 (in Chinese with English abstract).
- [8] 沈其韩. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景[C]//华北地台早前寒武纪地质研究论文集[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1–30.
Shen Qihan. Geological Characteristics and Settings of the Pre-cambrian Banded Magnetite Quartzite in North China Platform[C]//Cheng Y Q (ed.). *Collected Papers on Pre-cambrian Geology Study of North China Platform*. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1–30 (in Chinese with English abstract).
- [9] 郭洪方. 鞍山地区太古宙地壳的构造演化序列[J]. *中国区域地质*, 1994, (1): 1–9.
Guo Hongfang. The tectonic evolutionary succession of the Archean crust in the Anshan area[J]. *Regional Geology of China*, 1994, (1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张宝华, 蔡一廷, 张文博, 等. 鞍山地区早前寒武纪岩群的构造变形[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 1986, (2): 47–56.
Zhang Baohua, Cai Yiting, Zhang Wenbo, et al. Structural deformation of the Early Precambrian rock groups in the Anshan area, Liaoning Province[J]. *Journal of Jiling University (Earth Science Edition)*, 1986, (2): 47–56 (in Chinese with English abstract).
- [11] 任群智, 姚玉增, 金成洙. 鞍山黑石砬子铁矿地质特征[J]. *地质与资源*, 2007, 16(2): 95–98.
Ren Qunzhi, Yao Yuzeng, Jin Chengzhu. Geological characteristics of Heishilazi iron deposit in Anshan, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 2007, 16(2): 95–98 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhao G C, Wilde S M, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P–T path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2001, 107: 45–73.
- [13] 杨秀清, 李厚民, 薛春纪, 等. 辽宁歪头山铁矿床两类矿石地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. *地质学报*, 2013, 87(10): 1–13.
Yang Xiuqing, Li Houmin, Xue Chunji, et al. Geochemical characteristics of two iron ores from the Waitoushan iron deposit, Liaoning Province: Constraints on ore forming mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(10): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- [14] 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1–212.
Wu Jiashan, Geng Yuansheng, Shen Qihan, et al. *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China–Korea Paleo-Continent*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1–212 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测试方法研究[J]. *地质学报*, 1994, 68(4): 339–347.
Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, et al. A study on the rhenium–osmium geochronometry of molybdenites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(4): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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.
Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, et al. Precise Re–Os dating for molybdenite by ID–NN–TIMS with Carius tube sample preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2001, 20(4): 247–252 (in Chinese with English abstract).
- [17] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, 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.
- [18] 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.
Qu Wenjun, Du Andao. Highly precise Re–Os dating of molybdenite by ICP–MS with Carius tube sample digestion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2003, 22(4): 254–257 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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: 1455–1459.
- [20] Stein H J, Morgan J W, Schersten A. 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.
- [21] Ludwig K. *Isoplot/Ex, version 2.0: a geochronological toolkit for Microsoft Excel*[M]. Berkeley: Geochronology Center, 1999, Special Publication 1a.
- [22] 刘明军, 李厚民, 李立兴, 等. 辽宁弓长岭铁矿床二矿区类矽卡岩的岩石矿物学特征[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(6): 1067–1076.
Liu Mingjun, Li Houmin, Li Lixing, et al. Petrological and mineralogical characteristics of the skarnoid in No.2 diggings of the Gongchangling iron deposit, Liaoning, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(6): 1067–1076 (in Chinese with English abstract).
- [23] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 24–36.

- Zhai Mingguo. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(1): 24–36 (in Chinese with English abstract).
- [24] 程裕祺, 张寿广. 中国变质带、变质幕及其相关问题[J]. *中国区域地质*, 1982, 2: 1214.
- Cheng Yuqi, Zhang Shouguang. Notes on the metamorphic series and metamorphic belts of various metamorphic epochs of China and related problems[J]. *Regional Geology of China*, 1982, 2: 1214 (in Chinese with English abstract).
- [25] Zhai M G, Bian A G. Amalgamation of the supercontinental of the North China Craton and its break up during late– middle Proterozoic[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43: 219–232.
- [26] Zhai M G, Bian A G, Zhao T P. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of the Neoproterozoic and its breakup during the late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43 (Supp.): 219–232.
- [27] Geng Y S, Liu F L, Yang C H. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80: 819–833.
- [28] Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, et al. ~2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan– Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understand event from zircon U–Pb dating and Hf isotope composition[C]// Abstract with program of international discussion meeting on continental geology and tectonics. Xi'an: Northwest University Press, 2009: 54.
- [29] 陈江峰, 李延龄, 李平, 等. 辽宁鞍山—本溪地区富磁铁矿床硫同位素地质研究[J]. *地质与勘探*, 1985, 21(1): 32–37.
- Chen Jiangfeng, Li Yanling, Li Ping, et al. Geological study of sulfur from Anshan– Benxi area high– grade ores deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 1985, 21(1): 32–37 (in Chinese with English abstract).
- [30] Stein H J. Low– rhenium molybdenite by metamorphism in northern Sweden: Recognition, genesis, and global implications[J]. *Lithos*, 2006, 87: 300–327.
- [31] Brooks C K, Keays R R, Lambert D D. 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.
- [32] Snow J E, Reisberg L. Os isotopic systematics of the MORB mantle: Results from altered abyssal peridotites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133: 411–421.
- [33] Widom E, Shirey S B. Os isotope systematics in the Azores: Implications for mantle plume sources[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142: 451–465.
- [34] 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.
- [35] Shirey S B, Walker R J. The Re– Os isotope system in cosmochemistry and high– temperature geochemistry[J]. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 1998, 26: 423–500.
- [36] 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*, 1996, 319: 216–220.
- [37] 白瑾, 黄学光, 王惠初, 等. 中国前寒武纪地壳演化(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Bai Jin, Huang Xueguang, Wang Huichu, et al. *The Precambrian Crustal Evolution of China(2nd)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese with English abstract).
- [38] 贺高品, 叶慧文. 辽东–吉南地区早元古代两种类型变质作用及构造意义[J]. *岩石学报*, 1998, 14(4): 152–162.
- He Gaopin, Ye Huiwen. Two type of Early Proterozoic metamorphism in the eastern Liaoning to southern Jilin and their tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(4): 152–162 (in Chinese with English abstract).
- [39] 路孝平, 吴福元, 林景任, 等. 辽东半岛南部早寒武纪花岗岩质岩浆作用的年代学格架[J]. *地质科学*, 2004, 39 (1): 123–138.
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Lin Jingqian, et al. Geochronological framework of early Precambrian granitic magmatism in the eastern Liaoning Peninsular: Constraints on the early Precambrian evolution of the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 123–138 (in Chinese with English abstract).
- [40] Foster J G, Lambert D D, Frick L R, et al. Re– Os isotopic evidence for genesis of Archean nickel ores from uncontaminated komatiites[J]. *Nature*, 1996, 382: 703–706.
- [41] 李红艳, 毛景文, 孙亚利, 等. 柿竹园钨多金属矿床的Re–Os同位素等时线年龄研究[J]. *地质论评*, 1996, 42(3): 261–267.
- Li Hongyan, Mao Jingwen, Sun Yali, et al. Re– Os isotopic chronology of molybdenites in the Shizhuyuan polymetallic tungsten deposit, southern Hunan[J]. *Geological Review*, 1996, 42 (3): 261–267 (in Chinese with English abstract).
- [42] 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.
- [43] 毛景文, 张光弟, 杜安道, 等. 遵义黄家湾镍铂族元素矿床地质、地球化学和Re–Os同位素年龄测定——兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 234–243.
- Mao Jingwen, Zhang Guangdi, Du Andao, et al. *Geology, geochemistry, and Re–Os isotopic dating of the Huangjiawan Ni–Mo–PGE deposit, Zunyi, Guizhou Province*[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 234–243 (in Chinese with English abstract).
- [44] Mao J W, Du A D, Sletmann R, et al. Re– Os dating for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log pegmatite rare metal deposit in the central and southern Urals[J].

- Mineralium Deposita, 2003, 38: 251–257.
- [45] 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 等. 小秦岭北缘马家洼石英脉型金铜矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及其意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 140–145.
- Wang Yitian, Ye Huishou, Ye Anwang, et al. Re-Os age of molybdenite from the Majiawa Au-Mo deposit of quartz vein type in the north margin of the Xiaolinling gold area and its implication for metallogeny[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 140–145 (in Chinese with English abstract).
- [46] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 117–131.
- Chen Yuelong, Yang Zhongfang, Zhao Zhidan. Geochronology and Geochemistry of Isotope[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 117–131 (in Chinese with English abstract).
- [47] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qulian Mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 1815–1818.
- [48] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. Terra Nova, 2001, 13: 479–486.
- [49] 李厚民, 叶会寿, 王登红, 等. 豫西熊耳山寨凹钼矿床辉钼矿铼钼年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 133–142.
- Li Houmin, Ye Huishou, Wang Denghong, et al. Re-Os dating of molybdenites from Zhaiwa Mo deposit in Xionger Mountain, western Henan Province, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(2): 133–142 (in Chinese with English abstract).
- [50] Yao Junming, Hua Renmin, Qu Wenjun, et al. Re-Os isotope dating of molybdenites in the Huangshaping Pb-Zn-W-Mo polymetallic deposit, Hunan Province, South China and its geological significance[J]. Science in China (Series D), 2007, 50(4): 519–526.
- [51] Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Review, 2006, 29: 307–324.
- [52] Marschik R, Mathur R, Ruiz J, et al. An Archean Re-Os molybdenite age for the Gameleira Cu-Au-Mo mineralization, Carajas Province, Brazil[J]. Geological Society of America Annual Meeting, Abstract and Programs, 27–30 October 2002, paper N152–157.
- [53] Stein H J, Hannah J L, Zimmermann A, et al. A 2.5Ga porphyry Cu-Mo-Au deposit at Malanjikhand central India: Implications for Late Archean continental assembly[J]. Precambrian Research, 2004, 134: 189–226.
- [54] 邓小华, 陈衍景, 姚军明, 等. 河南省洛宁县寨凹钼矿流体包裹体研究及矿床成因[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1250–1266.
- Deng Xiaohua, Chen Yanjing, Yao Junming, et al. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhaiwa Mo deposit, Luoning county, Henan Province[J]. Geology in China, 2008, 35(6): 1250–1266 (in Chinese with English abstract).
- [55] 魏庆国, 姚军明, 赵太平, 等. 东秦岭发现~1.9 Ga 钼矿床——河南龙门店钼矿床 Re-Os 定年[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2474–2451.
- Wei Qingguo, Yao Junming, Zhao Taiping, et al. Discovery of a ~1.9 Ga Mo deposit in the eastern Qinling orogen: Molybdenite Re-Os age of the Longmudian Mo deposit in Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2474–2451 (in Chinese with English abstract).
- [56] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 172–175.
- Liu Yulong, Yang Gang, Chen Jiangfeng, et al. Re-Os isotopic dating of pyrite from the Baiyuebo REE-Ni-Fe deposit[J]. Chinese Science Bulletins, 2005, 50(2): 172–175 (in Chinese with English abstract).
- [57] 郭维民, 陆建军, 蒋少涌, 等. 安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中黄铁矿 Re-Os 同位素定年: 海底喷流沉积成矿的年代学证据[J]. 科学通报, 2011, 56(36): 3023–3028.
- Guo Weimin, Lu Jianjun, Jiang Shaoyong, et al. Re-Os isotope dating of pyrite from the footwall mineralization zone of the Xinqiao deposit, Tongling, Anhui Province: Geochronological evidence for submarine exhalative sedimentation[J]. Chinese Science Bulletins, 2011, 56(36): 3023–3028 (in Chinese).
- [58] 石贵勇, 孙晓明, 潘伟坚, 等. 云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 2012, 57(26): 2492–2500.
- Shi Guiyong, Sun Xiaoming, Pan Weijian, et al. Re-Os dating of auriferous pyrite from the Zhenyuan super-large gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, Southwestern China[J]. Chinese Science Bulletins, 2012, 57(26): 2492–2500 (in Chinese).

Re–Os isotopic dating of pyrite and molybdenite from the iron deposits in Anshan–Benxi area of Liaoning Province and its geological significances

LIU Ming–jun^{1,2}, LI Hou–min², YU Shi–xiang¹, XU Zong–xian¹,
YAO Liang–de¹, WEN Yi¹, ZHAO Hong–zhen¹

(1. *Institute of Geological Exploration, Liaoning Bureau of Metallurgic Geological Exploration, Anshan 114038, Liaoning, China;*

2. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: Rhenium and osmium isotopes in a molybdenite sample and ten pyrite samples were used to determine the timing of mineralization by ICP–MS. Re–Os model age of the molybdenite sample is (2376 ± 37) Ma, Re–Os ages of the ten pyrite samples yielded three kinds of ages: ① (2567 ± 36) Ma— (2540 ± 37) Ma (model age); ② (2237 ± 112) Ma (model dating); ③ (1572 ± 140) Ma (isochron age). These data suggest that the molybdenite of (2376 ± 37) Ma was formed during early Proterozoic, and was the oldest Re–Os model age of molybdenite, the pyrite of (2237 ± 112) Ma was formed during early Proterozoic, and both of them indicate that the molybdenite and the pyrite were derived from the crust and represented an important hydrothermal activity in 2.3 Ga; the pyrite of (2567 ± 36) Ma— (2540 ± 37) Ma was formed during new Archaeozoic period and yielded the oldest Re–Os model age, which indicates that the pyrite was formed with BIF in 2.5 Ga; the pyrite of (1572 ± 140) Ma was formed during middle Proterozoic, which indicates that pyrite was derived from the crust and represented a hydrothermal activity. The Re–Os isotopic dating result provides a new proof for the existence of hydrothermal activity in iron deposits of the Anshan–Benxi area, and is also important for understanding the ore–forming processes and tectonic evolution in this area.

Key Words: Re–Os isotopic dating; pyrite; molybdenite; banded iron formations; Anshan–Benxi area

About the first author: LIU Ming–jun, male, born in 1985, engineer, mainly engages in the study of ore deposit geology; E–mail: liumingjun2012@163.com.