

太行山北段河北阜平县赤瓦屋钼铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其对找矿的指示

张志远¹, 王文浩^{2*}, 丁照月², 安跃辉², 王志敏², 陈志宽², 谢桂青³

ZHANG Zhiyuan¹, WANG Wenhao^{2*}, DING Zhaoyue², AN Yuehui², WANG Zhimin²,
CHEN Zhikuan², XIE Guiqing³

1. 河北地质大学/河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031;

2. 河北省地质工程勘察院, 河北 保定 071051;

3. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei China;

2. Hebei Geological Engineering Exploration Institute, Baoding 071051, Hebei, China;

3. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要: 赤瓦屋斑岩型钼铜矿床是太行山北段斑岩-矽卡岩成矿带内探明的一个中型钼铜矿床, 钼铜矿体主要赋存于赤瓦屋岩体内部相的斑状花岗闪长岩中。为厘定赤瓦屋钼铜矿床的成矿时代和成矿物质来源, 利用辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法对赤瓦屋钼铜矿床中 7 件辉钼矿样品进行了成矿年代学测定, 获得的模式年龄为 129.1~130.6 Ma, 年龄加权平均值为 129.7±0.7 Ma, 对应的等时线年龄为 128.7±4.4 Ma, 模式年龄和等时线年龄在误差范围内基本一致, 指示赤瓦屋钼铜矿床形成于早白垩世。赤瓦屋钼铜矿床辉钼矿样品的 Re 含量为 $25.9 \times 10^{-6} \sim 37.1 \times 10^{-6}$, 表明其成矿物质来源于壳幔混源。结合区域年代学资料, 认为太行山北段成矿带在 134~124 Ma 存在一期岩浆热液成矿事件, 斑岩铜矿型钼铜矿床的找矿潜力较大。

关键词: 辉钼矿; Re-Os 同位素年龄; 斑岩钼铜矿床; 成岩成矿时代; 赤瓦屋; 太行山北段

中图分类号: P618.2; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)09-1522-08

Zhang Z Y, Wang W H, Ding Z Y, An Y H, Wang Z M, Chen Z K, Xie G Q. Molybdenite Re-Os isochron age of the Chiawu Mo-Cu deposit in Fuping County, Hebei Province in northern Taihang Mountains and its prospecting significance. Geological Bulletin of China, 2021, 40(9): 1522-1529

Abstract: The Chiawu porphyry Mo-Cu deposit in the northern Taihang Mountains porphyry-skarn metallogenic belt is a medium-sized one discovered in recent years. The Mo-Cu orebodies are mainly hosted within porphyritic granodiorite of internal facies in Chiawu pluton. In order to determine the age of mineralization and the source of molybdenum, seven molybdenite samples were collected from the Chiawu Mo-Cu deposit for Re-Os dating. The Re-Os dating yields model ages ranging from 129.1 Ma to 130.6 Ma, with a weighted mean age of 129.7±0.7 Ma, and obtains an isochron age of 128.7±4.4 Ma. Evidently, model ages are consistent with isochron age within the error ranges, which constrains the ore-forming age of Chiawu Mo-Cu deposit at the Early Cretaceous. The Re values of molybdenum vary in the range of $25.9 \times 10^{-6} \sim 37.1 \times 10^{-6}$, indicating that they were derived from mixing of crust and mantle sources. Combined with available chronologic data, it is recognized that a regional magmatic-metallogenic event might exist

收稿日期: 2020-10-31; 修订日期: 2020-12-16

资助项目: 河北省自然科学基金项目《河北木吉村斑岩型钼铜矿床短波红外光谱蚀变矿物填图及勘查应用研究》(编号: D2020403060) 和河北省地质矿产勘查开发局项目《太行山北段斑岩型成矿带成矿规律研究及找矿方向研究》(编号: 454-0502-JBN-0HDV)

作者简介: 张志远(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 从事斑岩-矽卡岩型金属矿床研究。E-mail: zhangzhiyuan@hgu.edu.cn

* 通信作者: 王文浩(1965-), 男, 教授级高工, 从事矿产地质及区域地质研究。E-mail: ww198@163.com

during the 134~124 Ma in northern Taihang Mountains. The prospecting potentiality of porphyry Cu-Mo deposits is great in this area.

Key words: molybdenite; Re-Os isotopic ages; porphyry Mo-Cu deposit; petrogenic and metallogenic ages; Chiawawu; northern Taihang Mountains

太行山北段成矿带位于中国东部华北克拉通中部的造山带北端,受克拉通构造演化及中生代板块活动的影响。中生代古太平洋板块的俯冲诱发了华北克拉通东部整体的裂解,在上涌的软流圈作用下,富集的岩石圈地幔发生部分熔融形成了规模巨大的中生代岩浆活动^[1-3],同时发育大量的斑岩型铜钼矿和金矿床,是中国东部重要的成矿单元组成^[4-5]。近年,在太行山北段成矿带的东北部新探明了木吉村大型斑岩型铜钼矿床、安妥岭大型斑岩型钼矿和大湾大型斑岩-矽卡岩型锌钼矿床,其成矿时代主要集中在 142~147 Ma^[6-8];随着找矿勘查的不断深入,在太行山北段成矿带的西南部赤瓦屋和麻棚岩体内及其周围,探明了石湖大型金矿床^[9],以及多个中小型钼矿床和银铅锌矿床^[10],显示太行山北段具有较大的找矿潜力。

赤瓦屋钼铜矿床是太行山北段西南部地区的典型矿床之一,20 世纪 50—60 年代曾有多地勘单位在此进行地质找矿工作,仅查明了少量铜金属资源量。进入 21 世纪以来,河北省地质工程勘察院 2011—2016 年开展了 3 次普查工作,查明了控矿构造、明确了蚀变矿化分带,初步圈定钼、铜、钨矿体 42 个,主矿体 5 个。其中,钼金属量 1.4×10^4 t,平均品位 0.064%,铜金属量 3.5×10^4 t,平均品位 0.34%,钨金属量 0.15×10^4 t,平均品位 0.157%,钼已达中型矿床规模,且主矿体边界远未控制,具备大型矿床找矿远景。赤瓦屋钼铜矿床位于赤瓦屋岩体内,前人对赤瓦屋岩体开展了锆石 U-Pb 测年工作^[11-14],显示赤瓦屋岩体形成时间主要集中在 126~134 Ma,明显晚于太行山北段成矿带的东北部斑岩型矿床的形成时间(约 140 Ma)。此外,钼铜矿化呈脉状和浸染状产于斑状花岗闪长岩中,表明其形成时代不早于 134 Ma,推测在太行山北段西南部存在另外一期岩浆热液成矿事件^[11]。由于赤瓦屋矿床的成矿时代还没有精确厘定,制约了对太行山北段西南部岩浆热液成矿作用的深入研究。因此,本文对赤瓦屋钼铜矿床典型矿石开展辉钼矿 Re-Os 测年工作,结合区域含矿岩体的年代学资料,以期对太行山北段中生代金属矿床的成矿规律有更明确的

认识。

1 区域地质

华北克拉通是全球最古老的克拉通之一,经历了多阶段的构造演化和强烈的变质改造,多数研究认为,克拉通的东、西板块沿中部造山带拼合,于 1.85 Ga 左右完成克拉通化^[15-16]。晚中生代以来,大规模的伸展作用使华北克拉通中部造山带发生强烈的构造岩浆活动,形成了 NNE 向展布的太行山构造岩浆岩带^[17]。太行山北段的构造演化大致经历了 3 个主要阶段,分别为太古宙变质基底形成阶段、元古宙—古生代稳定发展阶段和中生代活化阶段^[18]。阜平杂岩是华北克拉通太古宙变质结晶基底的一部分,该套岩石地层单元普遍遭受强烈区域变质及混合岩化作用^[19]。除阜平杂岩外,还发育一系列元古宙—侏罗纪沉积地层。

太行山北段的中生代岩浆岩带主要由中生代火山岩及其之后发育的次火山岩组成,区域内由北向南依次发育大河南、王安镇岩体及赤瓦屋、麻棚岩体(图 1),其展布受东、西两侧分布的 NNE 向紫荆关断裂和乌龙沟断裂带控制^[20]。岩体和脉岩为铜、钼、金、银等多金属矿的形成提供了广泛的成矿物质和热源^[21]。

2 矿床地质

赤瓦屋钼铜矿床位于太行山北段成矿带的西南部,赋矿围岩主要为斑状花岗闪长岩。赤瓦屋岩体平面上呈近圆状,直径约 5 km,面积约 63 km²。赤瓦屋岩体由不同岩相组成,自岩体中部向外依次为:中心相为斑状花岗闪长岩;过渡相为细中粒花岗闪长岩;边缘相为细粒石英闪长岩,与阜平岩群元坊岩组具明显的侵入接触关系(图 2)。岩石呈灰白色,细中粒、不等粒半自形粒状结构,块状构造(图版 I)。此外,还发育少量的 SN 向花岗斑岩脉(图 2-a)。

矿床受赤瓦屋岩体中斑岩蚀变、密集节理、裂隙带和角砾岩控制,与钾长石化、硅化关系密切。面型蚀变强烈,分带明显,成矿元素具垂向分带,上

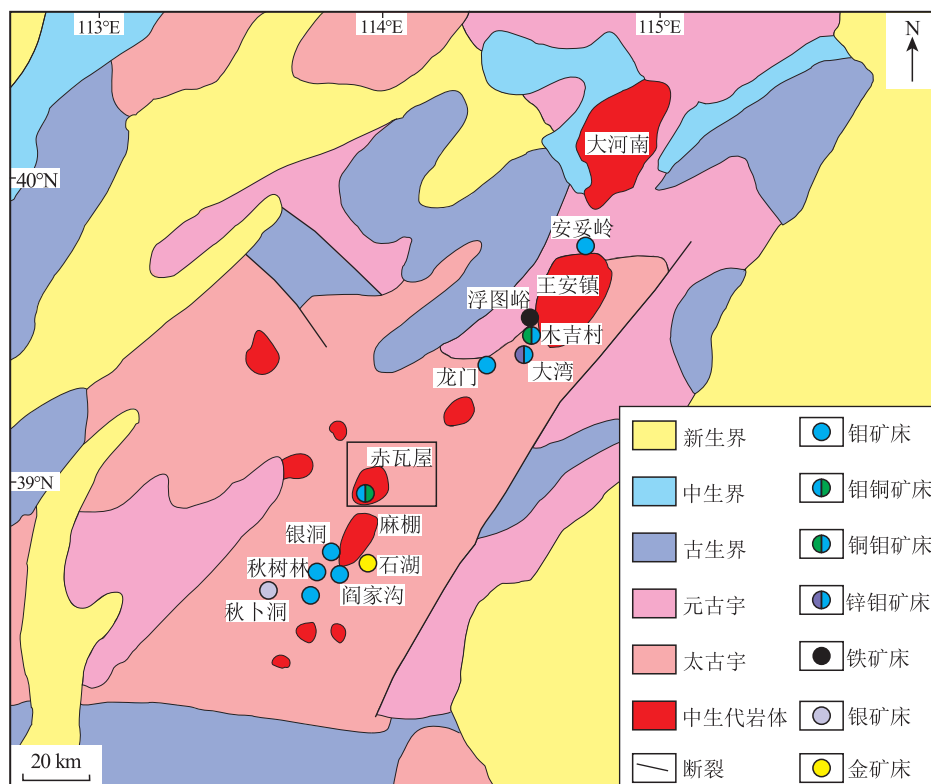


图1 太行山北段地质简图(显示主要岩体和重要矿床分布,据参考文献[11]修改)

Fig. 1 Simplified geological map of northern Taihang Mountains showing the distribution of major plutons and deposits

部为铜钼,下部以钼为主(图2-b)。地表矿化呈SE向透镜状零星分布,深部存在厚大矿体。初步圈定矿体42个,其中21号矿体是以钼为主的隐伏钼铜共生矿体(图2-b),矿体形态呈不规则似层状,局部有分支复合现象,矿体走向长400 m,斜深730 m,矿体赋存标高-320~250 m,厚1.64~37.49 m,平均厚度25.17 m,矿体厚度较稳定,变化系数86%,Cu品位为0.20%~0.58%,Mo品位为0.03%~0.17%。

产于斑状花岗闪长岩内的斑岩型矿石以铜钼为主,为矿床最主要的矿石类型^[21]。按照成矿元素的不同,可以分为铜矿石、铜钼矿石和钼矿石,矿石呈浸染状、细脉状(图版I)产出,分布于斑状花岗闪长岩、花岗闪长岩钾长石化硅化蚀变带中。矿石中金属矿物主要为黄铜矿、辉钼矿,次要矿物为黄铁矿、磁黄铁矿,闪锌矿(图版I-d~i)。浅部黄铜矿多氧化为孔雀石、蓝铜矿,辉钼矿氧化为钼华,磁铁矿、黄铁矿氧化为褐铁矿。非金属矿物主要为斜长石、钾长石、石英、角闪石、绢云母、黑云母等。根据矿石的组构和蚀变特征,笔者认为赤瓦屋钼铜矿

床具有典型斑岩型矿床的特点。

赤瓦屋钼铜矿床的赋矿围岩蚀变强烈,具有蚀变范围广、多阶段叠加不同分带的特点^[21],成矿作用依据蚀变矿物组合可分为钾化硅化阶段和石英硫化物阶段:①钾化硅化阶段,为区内早期高温热液活动阶段,具有面型蚀变特征,局部钾化、硅化强烈,钾长石含量明显增加,多由斜长石斑晶、斜长石基质蚀变为细粒钾长石,部分钾长石斑晶具增生边结构。钾化、硅化与节理裂隙密切相关,沿岩体节理裂隙钾化、硅化,主要表现为钾长石、石英呈条带状、细脉状,不规则分布(图版I-a,b),多组节理裂隙交会处钾长石、石英呈团块状,微裂隙形成网脉状硅质条带,蚀变矿物组合以钾长石和石英为主,该阶段为铜和钼矿体的主要赋存阶段,黄铜矿和辉钼矿在硅化石英脉中呈浸染状产出(图版I-d~f);②石英硫化物阶段,穿切了岩体和早期钾化蚀变带,石英呈脉状分布,伴生黄铁矿化、辉钼矿化和弱黄铜矿化(图版I-c),该阶段与银等多金属关系密切^[21]。

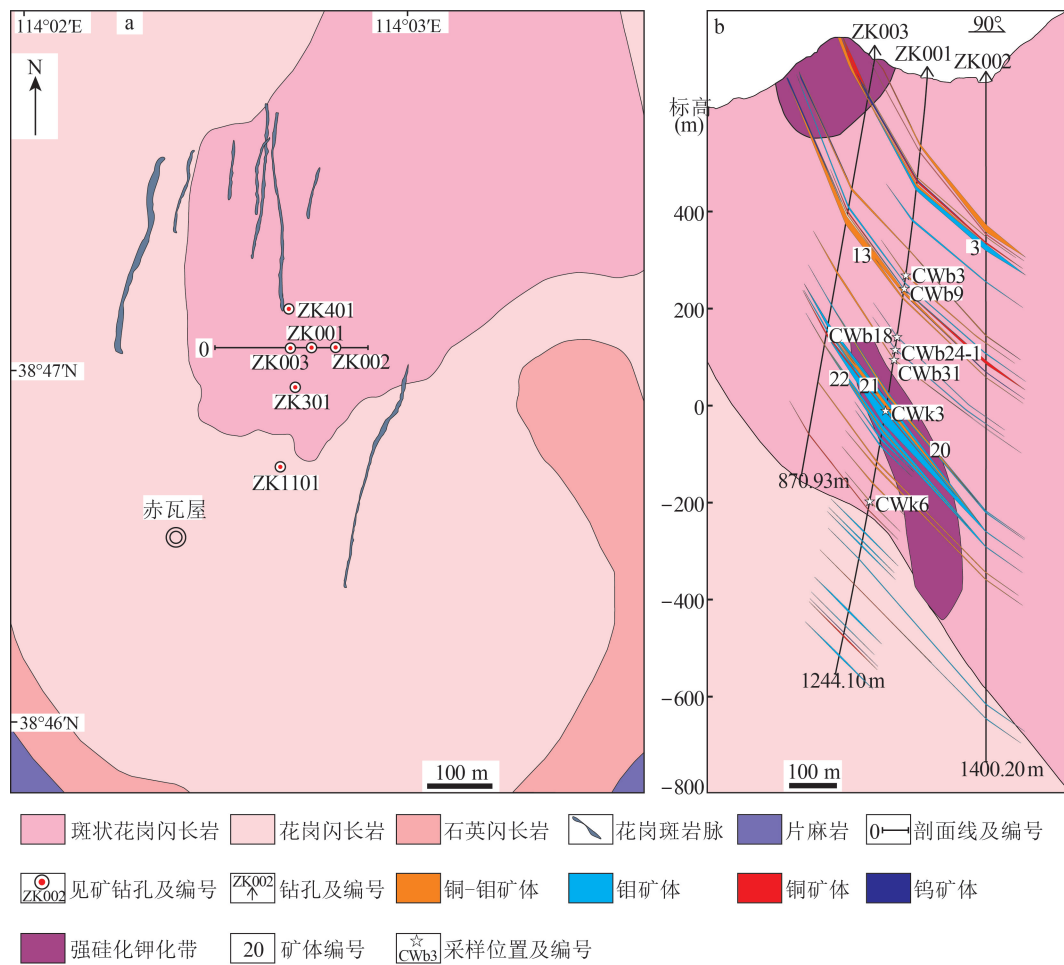


Fig.2 Sketch geological map(a)and section along No.0 exploration line(b) of Chiawawu Mo-Cu deposit

3 样品采集与测试方法

辉钼矿样品均采自赤瓦屋矿区 ZK001 中(图 2-b),主要矿石矿物为辉钼矿和黄铁矿。辉钼矿呈细脉浸染状、薄膜状分布于石英硫化物脉和斑状花岗闪长岩中。辉钼矿单矿物分离在河北省廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司完成。矿石样品经粉碎、分离、粗选和精选,获得纯度大于 99%的辉钼矿单矿物。辉钼矿颗粒细小,单颗粒粒径为 0.03~0.10 mm。可以避免大颗粒辉钼矿由于 Re、Os 失偶引起的测年误差。单矿物晶体新鲜、无氧化、无污染,符合测试要求。

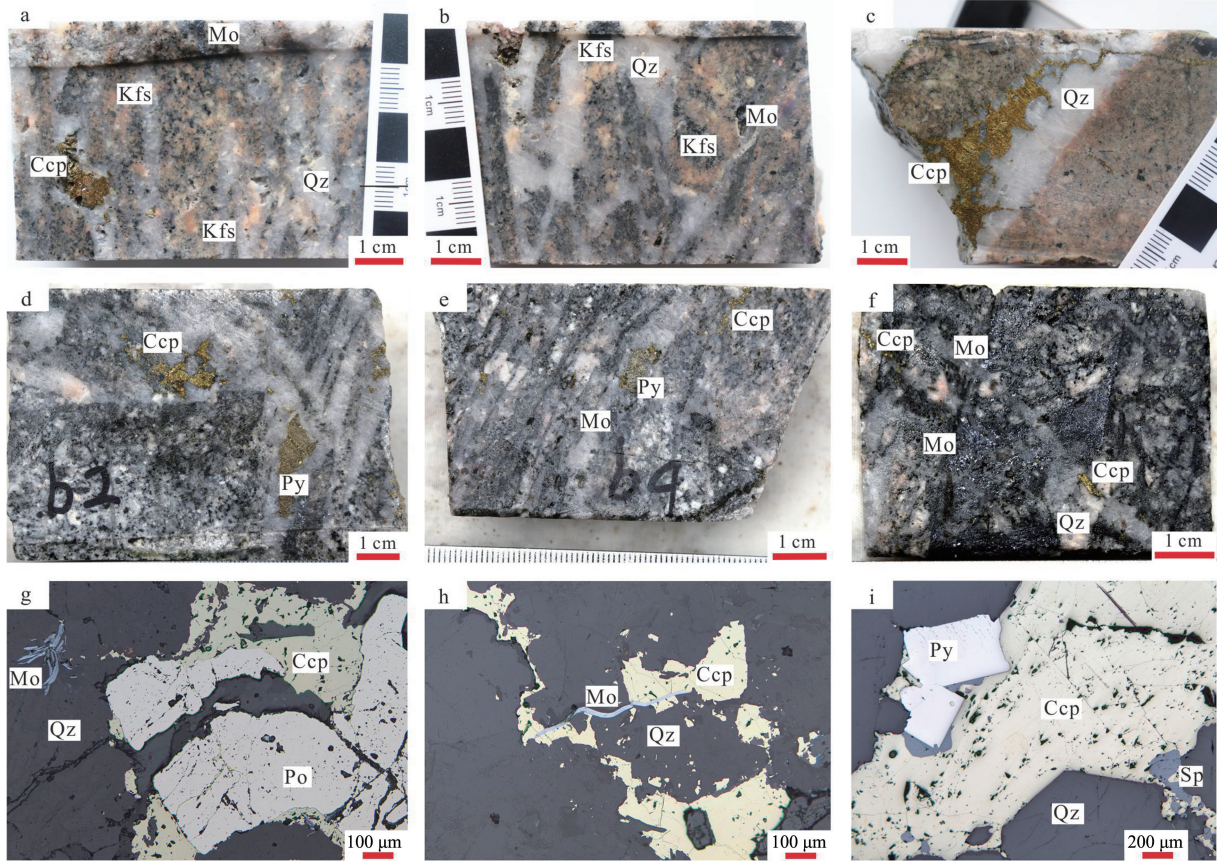
辉钼矿的 Re-Os 同位素分析测试在国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,采用 Carius 管封闭溶样分解样品。Re-Os 同位素分析原理及详细分析流程见参考文献[22-30]。采用美国 TJA 公司生产的 TJAX-series 电感耦合等离子体质谱仪

(美国 Thermo 公司)测定同位素比值。对于 Re,选择质量数 185、187,用质量数 190 监测 Os;对于 Os,选择质量数 186、187、188、189、190、192,用质量分数 185 监测 Re。TJAX-series ICP-MS 测得 Re-Os 和 ^{187}Os 含量(质量分数,下同)空白值分别为 0.0024 ng(不确定度 0.0003)、0.00036 ng(不确定度 0.00005)和 0.00002 ng(不确定度 0.00002),远小于所测样品和标样中 Re、Os 含量,因此对实验结果的影响可忽略不计。所获 Re-Os 同位素分析数据采用 Isoplot 软件^[31]进行 ^{187}Re - ^{187}Os 等时线拟合,获得同位素等时线年龄,模式年龄计算所用公式为: $t = 1/\lambda [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$,其中,衰变常数 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ^[32]。

4 测试结果

赤瓦屋钼铜矿床辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试结果见表 1,本次测得辉钼矿中的普 Os 含量很低,

图版 I Plate I



a, b. 黄铜矿和辉钼矿赋存于石英细脉中; c, d. 石英、黄铜矿、黄铁矿脉切穿斑状花岗闪长岩; e, f. 黄铜矿和辉钼矿在石英脉中呈浸染状产出; g. 浸染状辉钼矿, 黄铜矿和磁黄铁矿共生; h. 辉钼矿和黄铜矿共生; i. 黄铜矿和黄铁矿、闪锌矿共生; Kfs—钾长石; Qz—石英; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Mo—辉钼矿; Po—磁黄铁矿; Sp—闪锌矿

表 1 赤瓦屋钼铜矿床 Re-Os 同位素测试结果

Table 1 Molybdenite Re-Os isotope data of the Chiawu Mo-Cu deposit

样品号	样重/g	Re / 10 ⁻⁶		普 Os / 10 ⁻⁹		¹⁸⁷ Re / 10 ⁻⁹		¹⁸⁷ Os / 10 ⁻⁹		模式年龄/Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
CWb31	0.03097	31.6	0.35	0.0062	0.0162	19831	222	43.20	0.26	130.6	2.1
CWb3	0.02012	37.1	0.29	0.0011	0.0602	23344	184	50.27	0.41	129.1	1.9
CWb9	0.02025	30.3	0.29	0.0011	0.0481	19067	182	41.07	0.25	129.2	1.9
CWb18	0.02018	26.2	0.21	0.0011	0.0476	16445	133	35.63	0.21	129.9	1.8
CWb24-1	0.02047	32.5	0.32	0.0011	0.0474	20409	200	44.16	0.30	129.7	2.0
CWk3	0.02004	27.2	0.21	0.0011	0.0141	17115	135	37.02	0.25	129.7	1.9
CWk6	0.02018	25.9	0.19	0.0011	0.0137	16278	119	35.19	0.24	129.6	1.8

表明辉钼矿形成时几乎不含¹⁸⁷Os。其中,¹⁸⁷Os 由¹⁸⁷Re 经 β 衰变而来,说明所获得的模式年龄能准确地反映矿化年龄。

7 件辉钼矿样品的 Re 含量变化为 25.90×10⁻⁶~

37.14×10⁻⁶,平均为 30.11×10⁻⁶。辉钼矿模式年龄介于 129.1~130.6 Ma 之间,模式年龄加权平均值为 129.7±0.7 Ma(图 3-b),得到的等时线年龄为 128.7±4.4 Ma(图 3-a)。

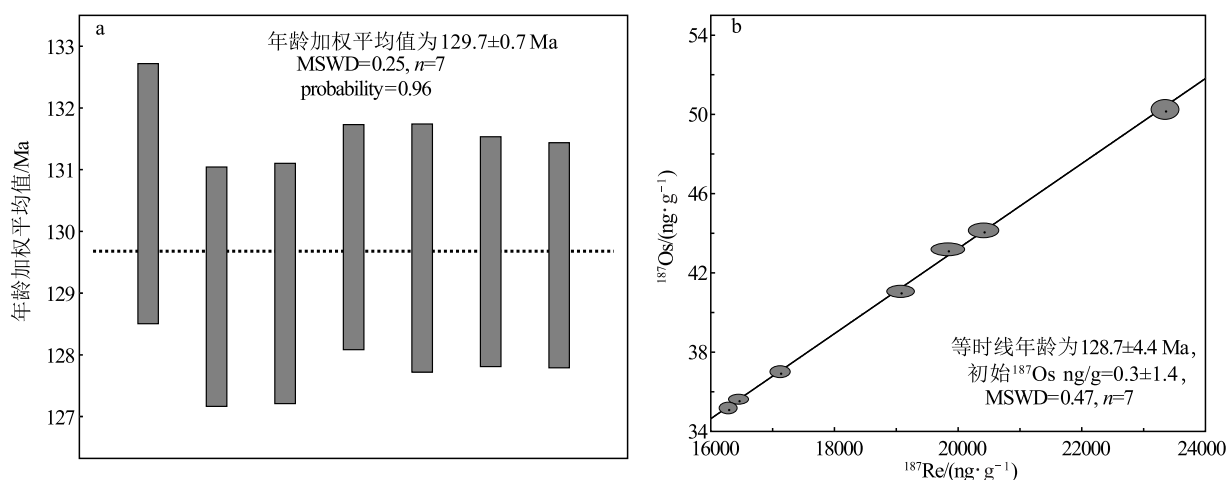


图 3 赤瓦屋钼铜矿床 Re-Os 同位素模式年龄(a)及等时线年龄(b)

Fig. 3 Molybdenite model ages(a) and Re-Os isochron age(b) of the Chiawu Mo-Cu deposit

5 讨论

5.1 赤瓦屋钼铜矿床成矿时代

Re 和 Os 元素均为亲铁元素,在硫化物中相对富集。辉钼矿富集 Re(10^{-6} 级),而普 Os 含量极低(接近于零),即辉钼矿中的 Os 完全是放射成因的 ^{187}Os 。辉钼矿 Re-Os 同位素体系是目前认为最合适的用于金属矿床直接定年的方法^[33],因此,Re-Os 同位素获得的辉钼矿年龄能为相关矿床的形成提供高精度的年代学制约。

本次分析的赤瓦屋钼铜矿床中辉钼矿的普 Os 含量很低(表 1),且模式年龄加权平均值(129.7 ± 0.7 Ma)与等时线年龄(128.7 ± 4.4 Ma)在误差范围内一致,表明辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄可以代表辉钼矿的形成年龄。由于本次用于 Re-Os 同位素测年的样品均采集于斑状花岗闪长岩体内,辉钼矿与黄铜矿共生(图版 I-h),样品均为该矿床的主要矿石类型,因而辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄(128.7 ± 4.4 Ma)可以直接代表该矿床的形成年龄。本次研究得到的测试结果,限定了赤瓦屋钼铜矿床的成矿时代为早白垩世。

5.2 成矿物质来源

研究表明 Re-Os 同位素体系是成矿过程中地壳物质混入程度高度灵敏的指示剂^[34]。一般从幔源到壳幔混合源再到壳源,辉钼矿中 Re 的含量逐渐降低^[35]:①成矿物质源自地幔或以地幔物质为主,其辉钼矿 Re 含量多在 $10 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 之

间;②成矿物质是壳幔混源的矿床,其辉钼矿 Re 含量为 $(n \times 10) \times 10^{-6}$;③成矿物质完全来自于地壳,其辉钼矿 Re 含量明显偏低,为 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。

赤瓦屋钼铜矿床中辉钼矿 Re 的含量为 $25.9 \times 10^{-6} \sim 37.1 \times 10^{-6}$,低于木吉村斑岩铜钼矿床和安妥岭钼矿床中辉钼矿的 Re 含量($37.5 \times 10^{-6} \sim 252 \times 10^{-6}$, $50.4 \times 10^{-6} \sim 105 \times 10^{-6}$)^[6-7],可见赤瓦屋钼铜矿床成矿物质来源以壳源为主,并混入少量幔源物质,具有壳幔混合的特征。综上所述,壳幔相互作用可能对成矿带大规模的花岗质岩浆活动和斑岩型钼铜多金属矿床的爆发式成矿作用具有重要贡献。

5.3 对找矿勘查的指示

高精度成岩成矿年龄数据的积累,对认识重大成岩成矿事件及指导找矿勘查非常重要。前人研究表明,太行山北段成矿带(图 1)的东北部主要为斑岩铜钼多金属矿床,其成矿作用主要集中在 $142 \sim 147$ Ma^[6-8]。近年来,大量的锆石 U-Pb 年代学数据表明,赤瓦屋岩体及其相邻的麻棚岩体主要形成于 $134 \sim 124$ Ma(表 2),表明太行山北段成矿带的西南部岩体主要形成于早白垩世。如前文所述,赤瓦屋钼铜矿区的脉体和蚀变特征类似于斑岩型钼铜矿床。在测试误差范围内,赤瓦屋钼铜矿床成矿年龄与赤瓦屋和麻棚矿集区成岩年龄一致,结合赤瓦屋和麻棚岩体周围的钼矿床年代学数据(表 2),表明太行山北段成矿带的西南部地区在 $134 \sim 124$ Ma 存在一次斑岩型矿床的岩浆-成矿事件,成岩成矿作用与华北克拉通岩石圈减薄或破坏有十分紧密的联系^[38-39]。

表 2 太行山北段赤瓦屋和麻棚岩体及相关矿床测年数据

Table 2 Chronology data of Chiwawu and Mapeng intrusions and their related ore deposits in the northern Taihang Mountains

矿床及相关岩体名称	年龄/Ma	测试方法	参考文献
赤瓦屋钼铜矿床	128.7±4.4	辉钼矿 Re-Os 等时线法	本文数据
秋树林钼矿	129.06±1.13	辉钼矿 Re-Os 模式年龄	[10]
阎家沟钼矿	126.7±1.1	辉钼矿 Re-Os 等时线法	[10]
银洞钼矿	127.6	辉钼矿 Re-Os 模式年龄	[10]
赤瓦屋岩体	134±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[11]
	133±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[11]
	131±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[11]
	128±1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[11]
	134.0±5.3	锆石 SHRIMP U-Pb 法	[12]
	139.8±3.1	锆石 SHRIMP U-Pb 法	[12]
	126.4±2.4	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[13]
	130±1.0	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[14]
	128.2±1.5	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[14]
	131±2	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[9]
麻棚岩体	131±2	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[9]
	125±3	锆石 SHRIMP U-Pb 法	[36]
	125.4±2	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[13]
	126.2±2	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[13]
	128.3±1.6	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[37]
	125.1±1.1	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[37]
	124.3±1.3	锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法	[37]

与同时期类似大地构造背景的中国东部其他地区对比,长江中下游斑岩型铜金钼矿形成于 145 Ma 左右,玢岩型铁矿及少量金矿床形成于 130~125 Ma^[40-42];在东秦岭—大别地区,斑岩型钼矿床主要形成于 148~138 Ma,金钼矿床主要形成于 131~112 Ma^[43-44]。前人在对华北、东北及长江中下游地区成岩成矿作用规律研究的基础上,提出古太平洋俯冲及构造体制的转变(侏罗纪—白垩纪),使中国东部出现了 2 期重要的成矿事件^[39]。目前已获得的成岩成矿年代学数据相对集中,推测太行山地区在中生代也有 2 期重要的成矿事件,从属于中国东部在侏罗纪、白垩纪的两期重要的成矿事件^[17],太行山北段成矿带除东北部 142~147 Ma 铜钼成矿事件外,在东南部地区还存在 134~124 Ma 的斑岩型钼铜矿床,找矿潜力较大。

6 结 论

(1)对赤瓦屋钼铜矿床 7 件辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素精确定年,获得赤瓦屋钼铜矿床成矿年龄为 128.7±4.4 Ma,表明成矿作用发生于早白垩世。

(2)赤瓦屋钼铜矿床中辉钼矿 Re 的含量为 $25.9\times 10^{-6}\sim 37.1\times 10^{-6}$,低于木吉村铜钼矿床和安妥岭钼矿床中辉钼矿的 Re 含量,表明其成矿物质来源以壳源为主,并混入少量幔源物质,具有壳幔混合的特征。

(3)太行山北段成矿带存在 2 期重要的成矿事件,除东北部 142~147 Ma 斑岩型铜钼成矿事件外,在东南部地区还存在 134~124 Ma 的斑岩型钼铜矿床,找矿潜力较大。

致谢:室内工作得到国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室李超博士和李欣慰老师的帮助与指导,两位审稿专家提出了宝贵的修改意见,让本文质量有了很大提高,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 徐义刚.太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关[J].地球科学,2006,31: 14-22.
- [2] 陈斌,翟明国,邵济安.太行山北段中生代岩基的成因和意义:主要和微量元素地球化学证据[J].中国科学(D 辑),2002,32(11): 896-907.
- [3] Chen B, Chen Z C, Jahn B M. Origin of mafic enclaves from the Taihang Mesozoic orogen, north China Craton[J]. Lithos, 2009, 110: 343-358.
- [4] 朱日祥,陈凌,吴福元,等.华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J].中国科学(D 辑),2011,41(5): 583-592.
- [5] Mao J W, Pirajno F, Lehmann B, et al. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79: 576-584.
- [6] 高永丰,魏瑞华,侯增谦,等.木吉村斑岩铜矿成矿作用:华北克拉通中生代岩石圈减薄的响应[J].矿床地质,2011,30: 890-902.
- [7] 者萌,胡建中,周伟,等.河北省安妥岭钼矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J].现代地质,2014,28: 339-347.
- [8] 黄典豪,杜安道,吴澄宇,等.华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铼-钼年龄及其地质意义[J].矿床地质,1996,15(4): 365-373.
- [9] Li S R, Santosh M, Zhang H F, et al. Inhomogeneous lithospheric

- thinning in the central North China Craton; Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 141-160.
- [10] 孙文燕. 太行山中段银钼成矿系统结构及其深部找矿远景[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2014.
- [11] 李瑞玲, 段超, 陈志宽, 等. 太行山北段赤瓦屋铜钼矿化区花岗岩岩石的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *中国地质*, 2016, 43(5): 1761-1770.
- [12] 刘阳, 李程明, 穆一青, 等. 太行山北段赤瓦屋岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. *地质与勘探*, 2010, 46(3): 442-447.
- [13] 李林林, 韩宝福, 苗国均, 等. 太行山阜平杂岩中麻棚赤瓦屋岩体的时代、侵位深度及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(3): 289-306.
- [14] He X F, Santosh M. Crustal recycling through intraplate magmatism: Evidence from the Trans-North China Orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 95: 147-163.
- [15] Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, et al. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 55-76.
- [16] Zhao G C, Wilde S A, 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.
- [17] 段超, 毛景文, 谢桂青, 等. 太行山北段木吉村髻髻山组安山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其对区域成岩成矿规律的指示[J]. *地质学报*, 2016, 90(2): 250-266.
- [18] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划[J]. *现代地质*, 1994, 8(3): 349-356.
- [19] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 125-135.
- [20] 喻学惠, 任建业, 张俊霞. 太行山中段铜-金成矿条件及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 11-30.
- [21] 王雪飞. 综合物化探方法在河北保定赤瓦屋铜多金属矿区勘查中的应用研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2020.
- [22] 杜安道, 何红寥, 殷宁万, 等. 辉相矿的铼-钼同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 1994, 68(4): 339-347.
- [23] 杜安道, 屈文俊, 李超, 等. 铼-钼同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 288-304.
- [24] 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 铼-钼法及其在矿床学中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 11-80.
- [25] 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-钼地质年龄[J]. *岩矿测试*, 2003, 22(4): 254-262.
- [26] 屈文俊, 杜安道, 任静. 过氧化氢在黄铁矿的溶解过程中对铼-钼信号强度及年龄的影响研究[J]. *分析化学*, 2008, 8(2): 223-226.
- [27] 屈文俊, 杜安道, 李超. 金川铜镍硫化物样品中钼同位素比值的
- 高精度分析[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 219-222.
- [28] 李超, 杜安道, 屈文俊. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ^{187}Os 迁移模式研究[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 707-712.
- [29] 李超, 屈文俊, 杜安道. 铼-钼同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 233-238.
- [30] 李超, 屈文俊, 周利敏, 等. Carius 管直接蒸馏快速分离钼方法研究[J]. *岩矿测试*, 2010, 29(1): 14-16.
- [31] Ludwig K. Isoplot/Ex, version 2.0: A geochronological toolkit for Micros of Excel[C]//Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA, 2009.
- [32] Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group II A, III A, IV A and VI B iron meteorites[J]. *Science*, 1996, 271: 1099-1109.
- [33] 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(6): 479-486.
- [34] 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(6593): 703-706.
- [35] 李文昌, 余海军, 尹光侯, 等. 滇西北铜厂沟钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境[J]. *矿床地质*, 2012, 31(2): 282-292.
- [36] 刘阳, 李程明, 郑杰, 等. 太行山北段麻棚岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. *地质与勘探*, 2010, 46: 622-627.
- [37] Li Q, Santosh M, Li S R, et al. The formation and rejuvenation of continental crust in the central North China Craton: Evidence from zircon U-Pb geochronology and Hf isotope[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 95: 17-32.
- [38] Li S R, Santosh M. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 376-414.
- [39] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 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*, 2005, 31(1): 169-188.
- [40] Mao J W, Xie G Q, Duan C, et al. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43: 294-314.
- [41] 毛景文, 段超, 刘佳林, 等. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 1-14.
- [42] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. *地质学报*, 2011, 85(5): 712-730.
- [43] Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 4607-4626.
- [44] 毛景文, 罗茂澄, 谢桂青, 等. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展[J]. *地质学报*, 2014, 88(12): 2153-2175.