

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.05.002

山西中条山地区篦子沟、南河沟铜矿云母⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素年龄及其对成矿构造背景的约束

王梦琦¹, 毛景文¹, 叶会寿^{1*}, 王赛², 范成龙³, 李洪英¹, 毕珉烽¹WANG Mengqi¹, MAO Jingwen¹, YE Huishou^{1*}, WANG Sai², FAN Chenglong³, LI Hongying¹, BI Minfeng¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所/自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 广州海洋地质调查局/自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510075;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment/Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources/Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要: 篦子沟、南河沟铜矿床位于华北克拉通中部造山带南缘, 是山西中条山地区胡篦型铜矿的典型代表, 因严格受地层控制, 呈层状、似层状产出, 也被认为是沉积岩型层状铜矿床。这些矿床的成矿年龄仍未被精确测定, 成矿时代长期存在争议。在矿床学研究的基础上, 对篦子沟、南河沟铜矿内与矿化有关的蚀变黑云母开展了高精度的⁴⁰Ar-³⁹Ar测年。获得篦子沟铜矿床黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄为 1825 ± 13 Ma (MSWD=8.86), 对应的等时线年龄为 1820 ± 13 Ma (MSWD=5.67), 反等时线年龄为 1820 ± 13 Ma (MSWD=5.63); 南河沟黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄为 1861 ± 14 Ma (MSWD=8.17), 对应的等时线年龄为 1864 ± 16 Ma (MSWD=8.31), 反等时线年龄为 1865 ± 16 Ma (MSWD=8.47)。2个矿床的成矿年龄在误差范围内一致, 表明胡篦型铜矿热液期矿化年龄限定在1850 Ma左右。此年龄与中部造山带约1.85 Ga峰期变质和退变质作用时间一致, 综合已有研究成果推测, 该期成矿事件与碰撞造山事件耦合。区域上, 在侵入中条群的基性岩内发育含矿石英脉, 对脉内与硫化物伴生的白云母进行⁴⁰Ar-³⁹Ar定年, 获得其坪年龄 1851 ± 13 Ma (MSWD=7.47), 对应的等时线年龄为 1844 ± 19 Ma (MSWD=7.30), 反等时线年龄为 1844 ± 19 Ma (MSWD=7.28), 说明基性岩内的含矿石英脉与矿区内的热液期矿化为同一地质事件的产物, 印证了碰撞造山过程中产生的变质流体广泛作用于区域各地质体, 且影响范围广泛。

关键词: 云母⁴⁰Ar-³⁹Ar测年; 变质热液期; 成矿年龄; 胡篦型铜矿; 中条山; 华北克拉通

中图分类号: P618.41; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)05-0727-13

Wang M Q, Mao J W, Ye H S, Wang S, Fan C L, Li H Y, Bi M F. Mica ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotopic chronology of Bizigou and Nanhegou copper deposit in Zhongtiao Mountain region, Shanxi Province, and its constraint on metallogenic tectonic setting. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(5): 727-739

Abstract: The Bizigou and Nanhegou copper deposits are located in the southern margin of the Trans-North China Orogen of the North China Craton. They are typical of the Hubi type copper deposits in the Zhongtiao Mountain area of Shanxi Province. Because they are controlled by strata and like stratified, they are also considered as the sediment-hosted stratiform copper deposits. However, the mineralization age of these deposits has not been determined and remain controversial. In this paper, high-precision ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-03-21

资助项目: 中国地质调查局项目《全国矿产资源国情调查与综合评价》(编号: DD20190606)、自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(编号: KLMMR-2018-B-10)和中国地质调查局项目《重要矿种关键问题调查与矿产地质专题填图试点》(编号: DD20160124)

作者简介: 王梦琦(1993-), 男, 在读博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: Wangmengqi5766@163.com

* 通信作者: 叶会寿(1964-), 男, 研究员, 从事矿床研究与资源勘查工作。E-mail: yehuishou@163.com

mica in Bizigou and Nanhegou copper deposits was carried out. The plateau age of Bizigou copper deposit sample was 1825 ± 13 Ma (MSWD=8.86), and the corresponding isochron age was 1820 ± 13 Ma (MSWD=5.67), inverse isochron age of 1820 ± 13 Ma (MSWD=5.63). The samples from Nanhegou copper deposit obtained plateau age of 1861 ± 14 Ma (MSWD=8.17), the corresponding isochron age is 1864 ± 16 Ma (MSWD=8.31), and the inverse isochron age is 1865 ± 16 Ma (MSWD=8.47). The mineralization ages of the two deposits are consistent within the error range, indicating that the hydrothermal mineralization time of the Hubi type copper deposit is limited to ca. 1850 Ma. This age is consistent with the peak metamorphism and retrometamorphism of ca. 1.85 Ga in the Trans-North China Orogen. After that, it was found ore bearing quartz veins were developed in the mafic rocks of Zhongtiao Group. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite associated with sulfide in veins obtained the plateau age of 1851 ± 13 Ma (MSWD=7.47), the corresponding isochron ages of 1844 ± 19 Ma (MSWD=7.30) and inverse isochron ages of 1844 ± 19 Ma (MSWD=7.28), indicating that the mineralization is the product of the same geological event as the hydrothermal mineralization in the mining area. It is proved that metamorphic hydrothermal fluid widely acted on geological bodies throughout the region during the collision orogeny.

Key words: $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of mica; metamorphic hydrothermal; mineralization age; Hubi type copper deposit; Zhongtiao Mountains; the North China Craton

山西中条山矿集区富集了巨量铜矿资源,是中国乃至全球著名的前寒武纪铜矿带^[1-2]。在漫长的地质演化过程中,区内不仅形成铜矿峪斑岩型铜矿床,而且还发育一系列以变质碎屑岩为赋矿围岩的胡篦型铜矿床(包括南河沟、篦子沟、桐木沟、老宝滩等铜矿)、横岭关型铜矿床,探明铜资源储量达 390×10^4 t,且伴生其他金属元素,如 Co、Au、Mo、Ag 等^[1-2]。其中,胡篦型铜矿作为区内重要的矿床类型之一,品位高、伴生元素多、分布广,且矿床严格受地层控制呈似层状、带状产出,受到广泛关注,取得了一系列重要研究成果^[1-18],为区内成矿作用研究及指导找矿勘查工作作出重要贡献。但以往的研究多集中于矿床地质^[1-3, 9-11]、成矿流体^[15]、同位素地球化学^[16-18]等方面,对矿床成矿时代的研究还很薄弱。由于缺乏高精度成矿年代学数据,胡篦型铜矿的成因仍存在较大争议^[1-2, 5, 9, 11, 13, 15, 17],如火山-沉积变质成因^[3]、远火山沉积变质再造热液成因^[7]、热水喷流成因^[1]及沉积-变质成因^[2]。近年来,在流体包裹体和稳定同位素研究的基础上,沉积岩型层状铜矿的成因模式被广泛接受^[15]。

篦子沟铜矿床、南河沟铜矿床是区内矿床地质特征相似的 2 个大中型铜矿床,亦是胡篦型铜矿最具代表性的矿床,累计铜资源储量达 72×10^4 t,平均品位 1.20%。研究区经历了复杂而多期的变质作用,导致后期变质热液对早期成矿进行了叠加改造,且缺少合适的定年矿物加以约束成矿时代,因此对矿床成因认识模糊不清。针对胡篦型铜矿的成矿年龄,陶铨^[4]对篦子沟铜矿中的晶质铀矿进行了 U-Pb 定年,获得 1830 ± 34 Ma 的成矿年龄;孙海

田等^[5]通过对南河沟、桐木沟、老宝滩铜矿的赋矿围岩炭质片岩和石英钠长岩进行 Rb-Sr 等时线定年,获得 1832 ± 26 Ma 的年龄并认为其为成矿年龄;黄典豪等^[8]对篦子沟铜矿内的辉钼矿进行 Re-Os 定年,获得 1919~1980 Ma 的成矿年龄,耿艳光等^[19]则对同一矿区辉钼矿测得 1577 ± 31 Ma 的成矿年龄;近年来, Qiu 等^[17]对南河沟含铜矿脉进行黄铜矿 Re-Os 定年,获得 1952 ± 39 Ma 的成矿年龄。由此可见,对于胡篦型铜矿的成矿年龄依然难以精确限定。

为进一步厘定胡篦型铜矿变质热液脉状矿化的成矿时代,明确成矿事件与地质事件之间的关系,本文在矿床学研究的基础上,对篦子沟、南河沟铜矿中与硫化物伴生的黑云母和中条山地区基性岩内石英硫化物脉中的白云母开展高精度的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年,为深入研究区域成矿时空构架提供年代学证据。

1 区域地质背景

中条山地区位于华北克拉通中部造山带南缘(图 1-a)^[20-21],在约 1.85 Ga 时由东部陆块与西部陆块拼合而成^[20-30]。区内广泛出露前寒武纪基底及古老盖层。地层从老至新依次为:新太古界涑水杂岩,古元古界绛县群、中条群、担山石群,中元古界西阳河群^[31](图 1-a)。其中,涑水杂岩主要由一套 2.55~2.70 Ga 的 TTG 片麻岩及 2.30~2.62 Ga 的非 TTG 花岗岩组成^[32],构成基底的主体部分。绛县群不整合覆盖在涑水杂岩之上,由下部的横岭关亚群变质碎屑泥质岩和上部铜矿峪亚群变质浅海相碎屑岩-泥质岩和海相火山-沉积岩组成;其中上

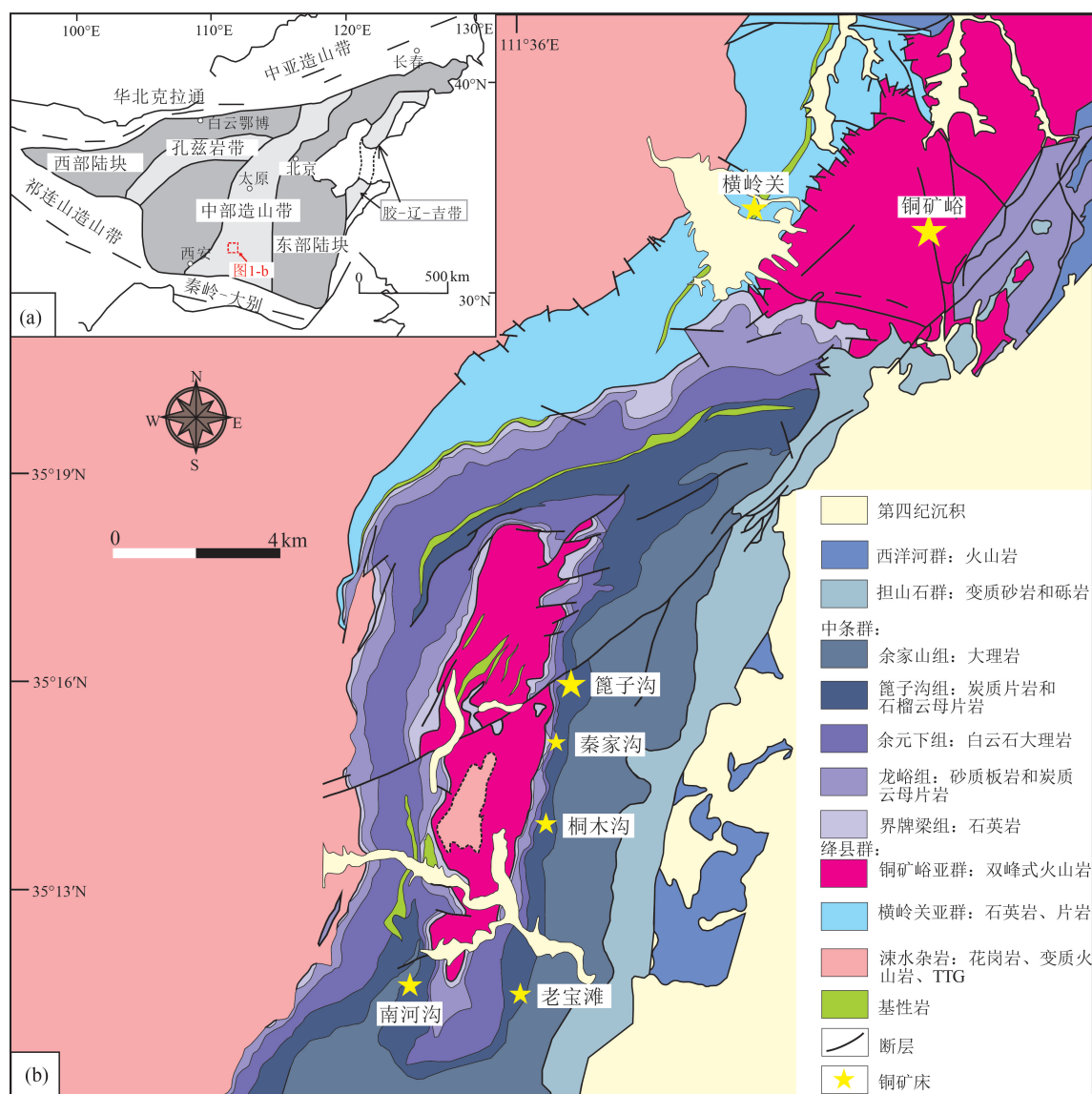


图 1 中条山地区大地构造位置(a)和地质图(b) (据参考文献[20]①修改)

Fig. 1 Tectonic location (a) and geological map(b) of the Zhongtiao Mountain area

部“双峰式”火山岩是铜矿峪斑岩型铜矿的赋矿层位。绛县群的沉积年代被限定为 2.1~2.2 Ga^[33-35]。中条群由一套浅变质碎屑砂泥质岩和碳酸盐岩组成,其沉积年限为 2059~2168 Ma^[33,36],是胡篦型铜矿的赋矿层位,与下伏绛县群呈不整合接触。担山石群为一套磨拉石建造,岩性为变质砾岩和石英岩组合,与下伏中条群呈不整合接触,其最大沉积年龄为 1848 Ma^[36]。西阳河群为一套巨厚的安山岩,与下伏担山石群呈不整合接触。中条山前寒武纪岩石除西洋河群外,均经受了区域变质作用,总体达到绿片岩相—低角闪岩相^[37]。区域变质作用可识别出 3 期,分别发育于绛县运动(约 2100 Ma)、中条运

动 I 幕(约 1900 Ma)和中条运动 II 幕(约 1850 Ma)^[18,33,38],对铜矿的活化、迁移和改造有重要影响。

区域上,构造主体为胡家峪—上玉坡短轴背斜,也是胡篦型铜矿的主要控矿构造。其轴向均呈近北东—南西向,核部为涑水期北峪奥长花岗岩片麻岩和绛县群,两翼主体由中条群构成(图 1-b)。

中条山地区以铜矿为主,目前已发现铜矿床(点)90 余处,其中大型铜矿 1 处,中型铜矿 6 处,分布集中,以硫化矿为主,易于采矿、选矿、冶炼。大多数铜矿床分布在中条山中部及东北部,主要有铜矿峪铜矿、篦子沟铜矿、南河沟铜矿、老宝滩铜矿、横岭关铜矿等(图 1-b)。

2 矿床地质特征

2.1 篦子沟铜矿地质特征

篦子沟矿床位于胡家峪-上玉坡短轴背斜南东

翼(图 2-a),核部为绛县群横岭关片岩,向东翼依次为中条群界牌梁组石英岩,龙峪组钙质片岩,余元下组硅化黑云母化白云石大理岩,篦子沟组黑色岩系,包括黑色炭质片岩、石榴子石钙质云母片岩、硅

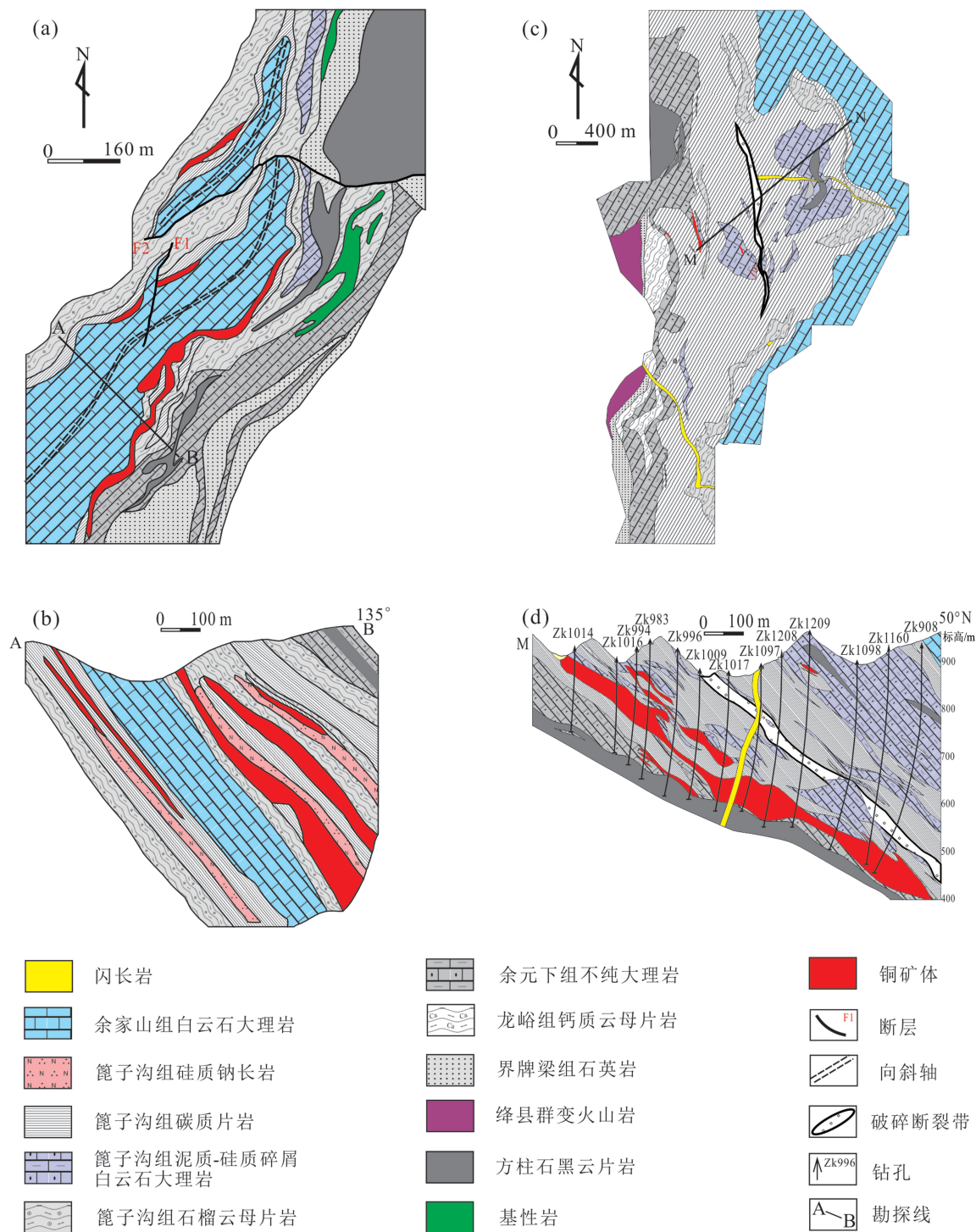


Fig. 2 Geological map of mining area

a—篦子沟铜矿矿区地质图;b—篦子沟铜矿勘探线 A-B 剖面图;c—南河沟铜矿矿区地质图;d—南河沟铜矿勘探线 M-N 剖面图

化黑云母化大理岩和硅质钠长岩,是主要的赋矿层位,以及余家山组厚层大理岩。区内岩浆岩发育较弱,且与成矿关系不明显。

篦子沟铜矿体主要赋存于余元下组顶部硅化黑云母化白云石大理岩和篦子沟组底部不纯大理岩、硅质钠长岩与炭质片岩接触部位,并严格受地层控制(图 2-b),呈层状、似层状、透镜状产出。其中 2 号矿体规模最大,矿体长 400~600 m,平均厚度 21.5 m;矿体走向北西,倾向北东,倾角 40°~45°;矿体平均品位 1.36%,最高可达 5.22%,资源储量占矿区总储量的 77.60%。

2.2 南河沟铜矿地质特征

南河沟铜矿床位于胡家峪-上玉坡短轴背斜南翼末端西侧次级倒转向斜内。该次级倒转向斜核部为余家山组大理岩,两翼由新到老依次为篦子沟组、余元下组、龙峪组和界牌梁组(图 2-c)。各组岩性与篦子沟铜矿床相似,不予赘述。

矿体呈层状和透镜状分布于篦子沟组与余元下组接触部位(图 2-d),赋矿围岩主要为黑色炭质片岩、钠长岩、白云石大理岩。Cu 平均品位 1.07%,Co 平均品位 0.027%,Au 平均品位 0.19 g/t,Ag 平均品位 1.25 g/t,探明铜资源储量约 32×10^4 t,钴 1700 t,金 1.119 t,银 10 t。矿区围岩热液蚀变较发育,主要蚀变类型有钠长岩化、黑云母化、碳酸盐化、硅化等。其中,黑云母化、钠长石化、碳酸盐化关系与铜矿化最密切。

2.3 铜矿化特征

篦子沟铜矿与南河沟铜矿具有极其相似矿化类型,按硫化物及其共生组合与围岩层(片)理的关系,可将矿石类型划分为 2 种:细脉浸染型和脉型

(图版 I-a、b)。前者被认为是原始沉积的产物,后者则为变质热液活动所致,反映了矿化的阶段性和基本特征:①细脉浸染状矿化,金属硫化物如黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等呈浸染状散布,与石英、方解石、白云石、钠长石等共生,呈细脉状充填于赋矿围岩片理中,部分金属硫化物呈断续拉长的条带状、条纹状或散点状沿片理(层理)发育(图版 I-a、d),这是原始沉积矿化受变质作用的一种表现^[3];②脉状矿化(图版 I-b、c),矿物组合主要为黄铜矿+黄铁矿±磁黄铁矿±闪锌矿±辉钼矿+石英+方解石±黑云母±钠长石等。变质热液含矿方解石石英脉较细脉浸染状矿脉更粗大,厚 2~30 cm,长数米,与围岩界线清楚,呈不整合状产出,沿构造裂隙充填,局部褶皱转折端处更发育,且明显切穿早期细脉浸染状矿化脉,规模较大,为工业开采的主要类型。

3 样品及测试方法

本次用于测试的 3 件样品分别为:①采自篦子沟铜矿坑道中变质热液期硫化物石英(方解石)脉内与黄铜矿伴生的黑云母(图版 I-e),手标本可见黑云母呈黑色,粗大鳞片状,镜下可见其为深褐色,呈片状,一组极完全解理,在含矿热液石英脉内与金属硫化物共生(图版 I-h);②采自南河沟铜矿中,切穿钠长岩的硫化物石英脉内与黄铜矿伴生的黑云母,镜下可见黑云母+石英+黄铜矿+辉钼矿的矿物组合(图版 I-g、i);③采自侵入于中条群中古元古代变辉长岩内的硫化物石英脉中与黄铜矿、黄铁矿伴生的白云母(图 3-a),白云母呈细小鳞片状,镜下可见白云母呈板状,一组极完全解理,干涉色较高,达二级顶部,且与黄铜矿共生(图 3-b、c)。

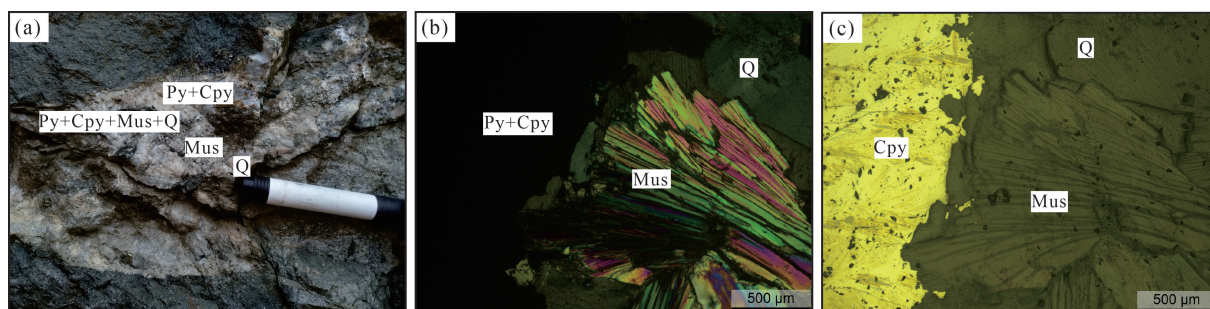
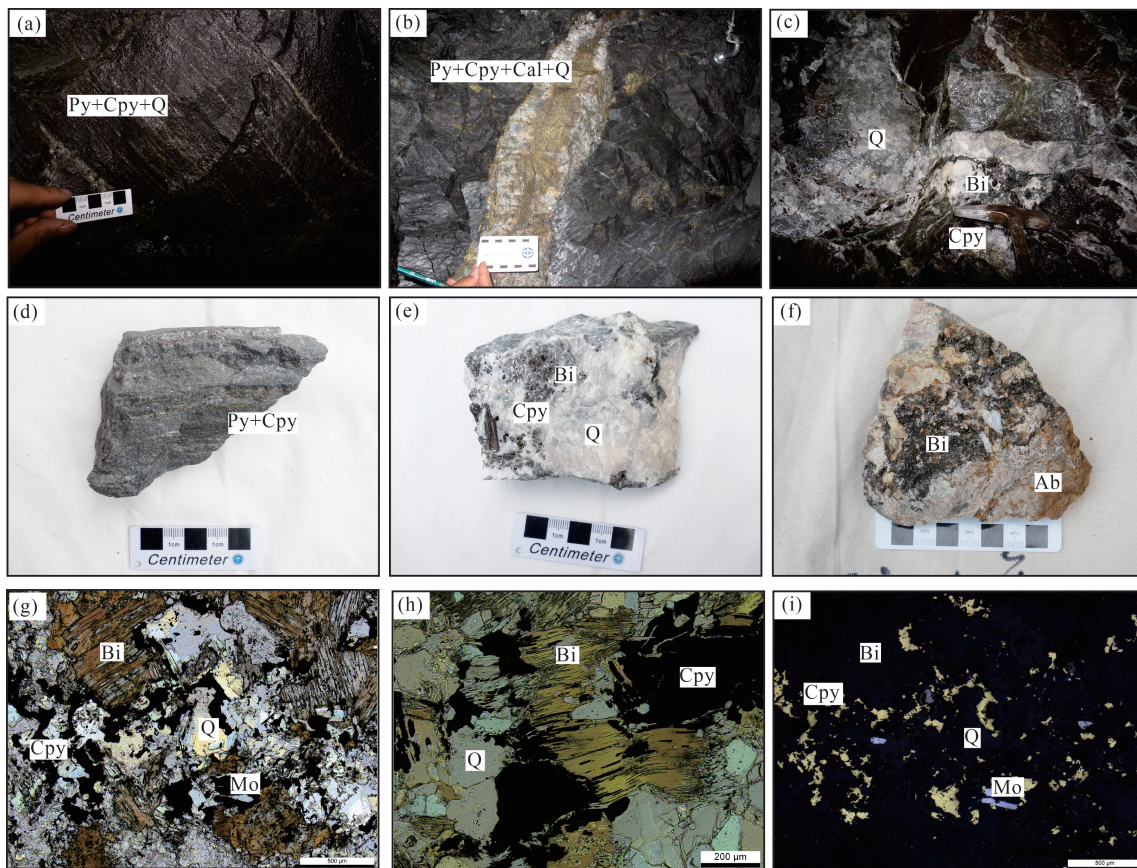


图 3 基性岩内硫化物石英脉及镜下照片

Fig. 3 Photographs of sulfides-bearing muscovite quartz veins in basic rock and its microphotographs

a—变辉长岩内的硫化物白云母石英脉;b—热液脉内白云母与黄铜矿、黄铁矿共生(正交光);c—热液脉内白云母与黄铜矿、黄铁矿共生(反射光);Cpy—黄铜矿;Py—黄铁矿;Mus—白云母;Q—石英

图版 I Plate I



a.早期细脉浸染状矿化;b.晚期脉状矿化;c.晚期含矿黑云母石英脉;d.早期条纹、散点状黄铜矿、黄铁矿化沿片理发育;e.篦子沟铜矿含矿黑云母石英脉手标本;f.南河沟铜矿含矿黑云母石英脉手标本;g.含矿热液脉内黑云母与黄铜矿、辉钼矿和石英共生(正交光);h.含矿热液脉内黑云母与黄铜矿共生(单偏光);i.含矿热液脉内黑云母与黄铜矿、辉钼矿共生(反射光)。Cpy—黄铜矿;Py—黄铁矿;Bi—黑云母;Mo—辉钼矿;Q—石英

云母单矿物的挑选工作由廊坊市宏信地质勘察技术服务有限公司完成,将选取的样品破碎至60目,在双目镜下挑选黑云母、白云母纯度均大于99%且无污染的样品。随后用超声破清洗,洗净后的样品被封入石英瓶内送至中国原子能科学院的“游泳池堆”,经受核反应堆中子照射,照射总时长为1440 min。照射过程使用B4孔道,中子流密度约为 $2.65 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,积分中子通量为 $2.29 \times 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$;同期接受中子照射的还有用于监控样的ZBH-25黑云母标样,其标准年龄为 $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$,K含量为7.6%。

年龄测试在中国地质科学院地质研究所 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学同位素实验室完成。通过石墨炉将样品进行阶段性升温加热,每个阶段加热10 min,净化20 min。质谱分析在多接收稀有气体质谱仪Helix MC上进行,每个峰值均采集20组数据。所

有数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.0002398$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$;用ArArCALC程序计算坪年龄校正、反等时线(Anthony Koppers, v2.5.2, 2012)。坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见参考文献[39-40]。

4 测试结果

篦子沟铜矿中黑云母(BZG12-34)、南河沟铜矿中黑云母(NHG-1)和基性岩中的白云母(DB735-3)3个样品的阶段加热 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素分析结果见表1、表2、表3,相对应的年龄谱、正等

表 1 篦子沟铜矿黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温测年数据

Table 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar stepwise heating analytical data for biotite from the Bizigou copper deposit

T/℃	³⁶ Ar[fA]	³⁷ Ar[fA]	³⁸ Ar[fA]	³⁹ Ar[fA]	⁴⁰ Ar[fA]	⁴⁰ (r)/ ³⁹ (k)	⁴⁰ Ar(r)/%	³⁹ Ar(k)/%	年龄/Ma	2σ
800	176.69583	0.000000	36.50807	30.6123	67116.21	486.81277	22.20	1.91	1832	52
840	92.04321	0.000000	19.80003	38.4186	46725.32	508.25295	41.79	2.40	1882	30
880	50.57066	0.000000	20.61411	172.1045	102693.61	509.85963	85.45	10.74	1885.5	7.8
980	21.44286	66.750257	16.91062	205.6011	112053.42	514.33801	94.35	12.82	1895.7	9.8
1020	19.67498	0.000000	15.17454	178.7073	95857.73	503.85685	93.93	11.15	1871.6	6.2
1090	57.88834	0.000000	33.20047	335.4301	180910.60	488.33723	90.54	20.92	1835.4	6.8
1120	12.13816	0.000000	18.43790	255.5425	128499.68	488.80957	97.21	15.94	1836.5	5.3
1150	8.10220	0.000000	16.24498	240.7596	118507.76	482.27536	97.98	15.02	1821.0	3.8
1180	1.07863	0.000000	6.96763	105.7083	51211.25	481.43828	99.38	6.59	1819.0	4.1
1210	0.17933	0.000000	1.69050	27.8751	13496.72	482.28008	99.61	1.74	1821.0	5.0
1240	0.99908	0.000000	0.69618	10.5787	5433.65	485.72934	94.57	0.66	1829.2	7.7
1400	3.55914	0.000000	0.66327	1.7329	1944.94	515.43722	45.92	0.11	1898	43

表 2 南河沟铜矿黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温测年数据

Table 2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar stepwise heating analytical data for biotite from the Nanhegou copper deposit

T/℃	³⁶ Ar[fA]	³⁷ Ar[fA]	³⁸ Ar[fA]	³⁹ Ar[fA]	⁴⁰ Ar[fA]	⁴⁰ (r)/ ³⁹ (k)	⁴⁰ Ar(r)/%	³⁹ Ar(k)/%	年龄/Ma	2σ
830	73.83705	0.00000	14.72764	39.4528	38567.6	424.52253	43.43	2.02	1687	22
860	52.17596	0.00000	11.17139	62.3765	43778.1	454.65584	64.78	3.19	1764	12
890	88.03006	0.00000	17.61674	48.3965	49039.0	475.77527	46.95	2.48	1815	22
920	71.23406	0.00000	17.06537	145.6097	94135.9	501.92783	77.64	7.45	1877.1	5.9
980	12.25865	0.00000	3.40258	57.2300	30985.5	478.11929	88.31	2.93	1820.9	4.6
1010	42.87751	0.00000	11.56203	154.1373	88390.9	491.24955	85.66	7.89	1852.1	4.8
1040	92.97176	67.87742	21.30473	165.2197	109539.5	496.89904	74.92	8.45	1865	13
1070	76.36794	216.13466	18.24138	186.1223	116213.3	503.69451	80.59	9.52	1881	18
1100	29.05731	0.00000	9.87440	196.6160	105293.6	491.85293	91.84	10.06	1853.5	7.5
1130	11.65506	0.00000	7.23272	226.6876	116192.4	497.36828	97.03	11.60	1866	12
1160	7.28902	0.00000	5.26340	195.9159	100811.9	503.56868	97.86	10.03	1880.9	7.0
1190	1.20144	0.00000	3.93210	190.7202	94653.9	494.43091	99.62	9.76	1859.6	6.1
1220	2.08648	0.00000	4.62702	207.6087	103852.4	497.25665	99.41	10.63	1866	11
1250	1.31157	0.00000	1.41558	61.3139	29824.9	480.10337	98.70	3.14	1825.6	4.7
1300	2.00591	0.00000	0.49516	11.6520	6226.9	483.53157	90.48	0.60	1833.8	9.8
1400	3.61588	0.00000	0.63980	4.9203	3307.1	454.97528	67.69	0.25	1764	21

表 3 基性岩内石英硫化物脉中白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段升温测年数据

Table3 ⁴⁰Ar/³⁹Ar stepwise heating analytical data for muscovite from the sulfides-bearing quartz veins in basic rock

T/℃	³⁶ Ar[fA]	³⁷ Ar[fA]	³⁸ Ar[fA]	³⁹ Ar[fA]	⁴⁰ Ar[fA]	⁴⁰ (r)/ ³⁹ (k)	⁴⁰ Ar(r)/%	³⁹ Ar(k)/%	年龄/Ma	2σ
800	192.49119	0.000000	35.23279	8.1862	58186.8	159.48477	2.24	0.23	823	377
860	182.24442	20.265783	36.34226	170.8720	142391.4	518.20823	62.18	4.90	1908	15
950	62.43436	0.000000	16.92114	310.7092	179613.2	518.69200	89.73	8.91	1908.9	5.8
970	88.84845	0.000000	24.61812	482.0375	283437.2	533.52739	90.74	13.82	1942.3	4.5
1000	67.70976	0.000000	21.04461	643.7855	342349.7	500.69218	94.15	18.45	1868	11
1010	32.33111	0.000000	11.97875	467.8146	243796.0	500.71095	96.08	13.41	1868	10
1020	5.73966	0.000000	5.98579	371.6080	186383.5	496.99038	99.09	10.65	1859	10
1030	3.83061	0.000000	2.24855	127.8202	64188.6	493.31844	98.24	3.66	1850.3	4.4
1040	4.65581	0.000000	2.47282	138.1459	69678.5	494.42010	98.02	3.96	1852.9	4.6
1050	3.63382	0.000000	1.64754	86.0923	43276.1	490.19353	97.52	2.47	1842.9	4.3
1060	3.03562	0.000000	1.21217	60.1632	30213.1	487.27011	97.03	1.72	1836.0	6.0
1080	3.26425	0.000000	1.36329	59.4172	29920.7	487.33156	96.78	1.70	1836.2	4.3
1120	2.26651	0.000000	1.80064	104.1546	52818.1	500.67696	98.73	2.99	1867.5	4.5
1140	3.15040	0.000000	2.48257	145.1779	74117.0	504.10790	98.74	4.16	1875.4	5.3
1170	2.98468	0.000000	2.30369	143.1514	72817.8	502.51077	98.79	4.10	1871.7	5.1
1200	2.73909	0.000000	1.87604	107.2493	54743.5	502.88105	98.52	3.07	1872.6	4.5
1240	4.11148	0.000000	1.38814	54.4692	28616.6	503.06264	95.75	1.56	1873.0	4.3
1400	19.53027	0.000000	3.55394	7.6203	9340.3	468.37206	38.21	0.22	1791	29

时线及反等时线见图 4—图 6。在 800~1400℃和 830~1400℃范围内,分别对 BZG12-34、NHG-1、DB735-3 三个样品进行 12、16、18 个阶段的释热分析,且在各样品对应的中高温阶段(1090~1240℃、1010~1220℃、1000~1050℃)形成平坦的年龄谱,³⁹Ar 的释放量分别达到 60.88%、77.94%、52.61%,说明所测样品在地质历史时期 K-Ar 体系受热扰动的影响较小,其坪年龄结果可靠。样品 BZG12-34 的坪年龄为 1825 ± 13 Ma (MSWD=8.86),等时线年

龄为 1820 ± 13 Ma (MSWD=5.67,⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 343 ± 44),反等时线年龄为 1820 ± 13 Ma (MSWD=5.63,⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 339 ± 44);样品 NHG-1 的坪年龄为 1861 ± 14 Ma (MSWD=8.17),等时线年龄为 1864 ± 16 Ma (MSWD=8.31,⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 286 ± 23),反等时线年龄为 1865 ± 16 Ma (MSWD=8.47,⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 285 ± 23);样品 DB735-3 的坪年龄为 1851 ± 13 Ma (MSWD=7.47),等时线年龄为 1844 ± 19 Ma

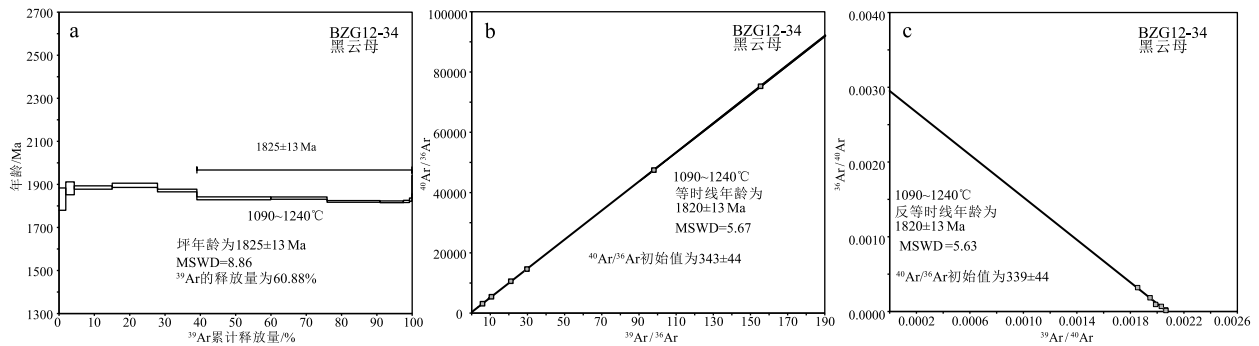


图 4 篦子沟铜矿床黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄(a)、等时线年龄(b)和反等时线年龄(c)

Fig. 4 ⁴⁰Ar-³⁹Ar plateau age(a), normal isochron age(b) and inverse isochron age(c) of biotite from Bizigou copper deposit

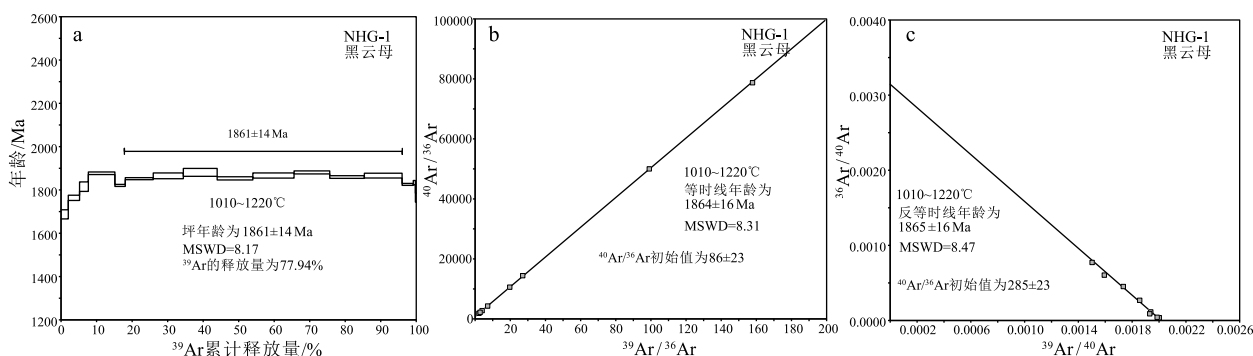


图 5 南河沟铜矿床黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄(a)、等时线年龄(b)和反等时线年龄(c)

Fig. 5 ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau age(a), normal isochron age(b) and inverse isochron age(c) of biotite from Nanhegou copper deposit

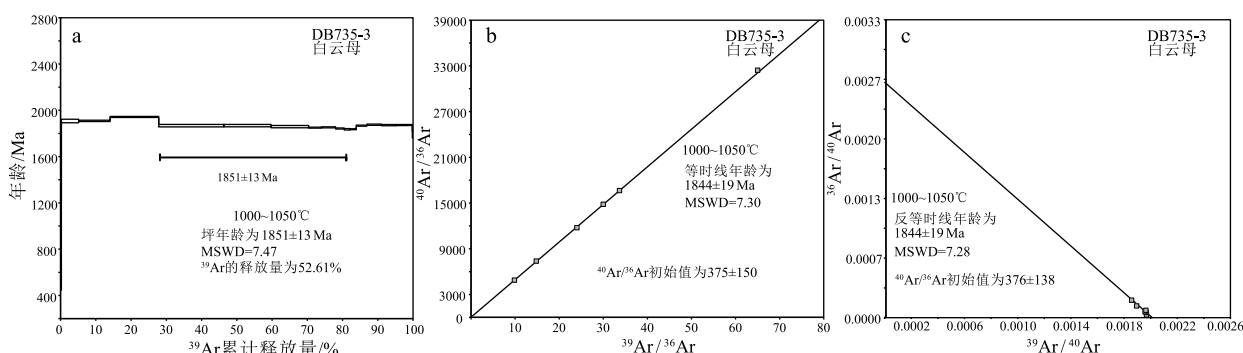


图 6 基性岩内含矿热液脉中的白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱(a)、等时线年龄(b)和反等时线年龄(c)

Fig. 6 ^{40}Ar - ^{39}Ar age spectrum(a), normal isochron age(b) and inverse isochron age(c) of muscovite from the sulfides-bearing quartz veins in basic rock

($\text{MSWD}=7.30$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 375 ± 150), 反等时线年龄为 $1844 \pm 19 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=7.28$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 376 ± 138)。3 件样品的所有 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值在误差范围内与现在大气氩比值(295.5)接近, 说明没有过剩氩, 个别年龄 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值较高是因为计算形成年龄的数据点年龄不完全一致, 且其同位素比值较接近, 所以误差较大, 并不表示有过剩氩。从分析结果可以看出, 样品的坪年龄、等时线年龄和反等时线年龄在误差范围内一致, 因此样品的坪年龄可以代表矿物的结晶年龄, 并由黑云母、白云母与硫化物的共生关系可知, 黑云母、白云母的结晶年龄可以代表矿床变质热液期成矿年龄。

5 讨论

5.1 成矿时代的厘定

胡篦型铜矿的成矿时代长期以来饱受争

议^[4, 8, 12, 17, 30]。一方面, 前些年缺少合适的定年矿物, 技术方法受限, 导致年龄的精准性欠佳, 如陶铨对篦子沟铜矿内中条群地层中的晶质铀矿进行定年, 获得 $1830 \pm 34 \text{ Ma}$ 的 U-Pb 年龄, 并推断此年龄为铜矿化年龄, 但晶质铀矿在矿床中的矿物共生关系不明, 即晶质铀矿与何阶段成矿有关不明, 且含 U 矿物过高的 U 含量可能会导致 U-Pb 年龄偏低^[4, 17]。另一方面, 部分年代学研究忽略了研究对象的基础地质特征, 无确凿的证据证明与成矿的相关性, 使所测年龄的地质意义不够明确, 如黄典豪等^[8]对篦子沟铜矿中未知产状的辉钼矿进行 Re-Os 定年, 获得 $1919 \sim 1980 \text{ Ma}$ 的模式年龄, 而耿艳光等^[19]对同一矿区辉钼矿测得 $1577 \pm 31 \text{ Ma}$ 的成矿年龄, 相差甚远; 张亮等^[12]对桐木沟铜矿内沿断裂分布和层间破碎带分布的辉钼矿脉进行 Re-Os 定年, 获得 $1901 \pm 24 \text{ Ma}$ 的成矿年龄。近年来, Qiu 等^[17]对南河沟铜矿中一期白云石-石英-硫化物脉

中的黄铜矿进行 Re-Os 同位素定年,获得 1952 ± 39 Ma 的成矿年龄,认为其代表南河沟铜矿退变质阶段脉状矿化的形成年龄。但是,目前并未有足够的热力学实验证据证明硫化物 Re-Os 体系的封闭温度^[41],所以黄铜矿 Re-Os 同位素体系是否遭到重置仍然存疑。

矿石中含钾的蚀变矿物及成矿流体的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄是厘定矿床成矿时代的有效手段之一,已被广泛应用于各类矿床成矿年代学的研究^[42-44]。本次研究中,所测 3 件云母样品均与热液脉内硫化物密切伴生,且云母 K-Ar 同位素体系封闭温度 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ ^[45-47],南河沟铜矿变质热液期成矿流体温度 $240 \sim 480^\circ\text{C}$ ^[15],两者相近。因此,笔者认为,本次分析测试的黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄可以代表篦子沟、南河沟铜矿变质热液期的成矿年龄。更进一步的是,作为胡篦型铜矿的 2 个典型矿床,篦子沟铜矿黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 (1825 ± 13 Ma) 和南河沟铜矿黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 (1861 ± 14 Ma),两者变质热液期成矿年龄在误差范围内基本保持一致,也验证了年龄结果的准确性。而区域上,出露于中条群内的古元古代基性岩体内也发育了近同期的(白云母坪年龄 1851 ± 13 Ma)铜矿化,不仅限定了基性岩侵入时间应早于 18.5 Ga,也说明此期矿化事件影响广泛,可能导致基性岩中的铜金属物质重新活化,以硫化物石英脉的形式呈现于此。综上,胡篦型铜矿的变质热液矿化年龄被较好地限定在古元古代(约 18.5 Ga)。

5.2 成矿作用与构造演化耦合关系

尽管胡篦型铜矿的成因争论不休,但越来越多的证据表明其更加符合沉积岩型层状铜矿(国外常被称作 Sediment-hosted stratiform copper or sedimentary copper deposits,国内常被称作砂岩型铜矿)模型^[3,15],其早期原始矿化是在盆地内沉积-成岩期形成,后期经历区域变质变形作用的改造叠加在早期成矿作用之上,掩盖了矿床的一些原生地质特征。世界上规模较大的沉积岩型层状铜矿主要分布于中非 Katangan 盆地赞比亚-刚果铜矿带^[48],俄罗斯 Udokan 盆地 Udokan 铜矿^[49]和欧洲 Zechstein 盆地 Kupferschiefer 铜矿^[50]。在近几十年的研究过程中,通过对这些典型的沉积岩型层状铜矿进行成矿年龄的测定,矿床的绝对年龄很好地约束了其成矿作用与地质事件的耦合关系,如在中非

赞比亚成矿带中,通过对 Musoshi 矿床的矿脉进行金红石 U-Pb 定年,获得 514 ± 2 Ma 的成矿年龄,结合区域构造背景,认为此年龄有力支持了 Lufilian 造山带峰后变质作用成矿的认识^[51]。

华北克拉通中部造山带被认为是东部陆块和西部陆块碰撞拼合的产物^[19-21,23-25,52-62],部分学者通过中部造山带内变质岩石学、地球化学和构造地质学的研究,获得较多的地质证据支持东西陆块在约 1.85 Ga 发生碰撞^[23-24,29,57,63-64]。中条山胡篦型铜矿位于中部造山带南缘,其大地构造背景受到中部造山带构造盆地演化的影响。刘超辉等^[65]结合前人研究成果总结出中部造山带构造盆地演化模式:①约 2.5 Ga,东部陆块与西部陆块中间被古海洋分隔,包括中条杂岩(一系列浅变质表壳岩系)在内及五台、吕梁杂岩都属于东部陆块西缘发展起来的主动大陆边缘弧的一部分,随着大洋岩石圈持续向东部陆块俯冲,形成了 TTG 及其他类花岗岩;②约 2.1 Ga,由于持续的自西向东高角度俯冲,东部陆块西缘活动大陆边缘弧后形成弧后盆地,中条山地区绛县群、中条群也在此沉积;③约 1.85 Ga,大洋闭合,东西部陆块陆陆碰撞作用开始,导致地壳加厚^[66],区内各地质体包括盆地内沉积的绛县群、中条群经受绿片岩相变质作用,变质作用峰期及退变质年龄被限定在 1849~1814 Ma^[23-24,29,57,63-64],前陆盆地沉积了一系列以磨拉石建造为主的碎屑岩,即中条山地区担山石群。

本文获得的 1.85 Ga 变质热液矿化年龄与中部造山带陆陆碰撞及变质作用时间一致,说明此次成矿事件与造山活动关系密切,产生的变质流体活化了早期沉积矿化并加以改造,使铜矿化重新富集沉淀^[3,15]。根据中条群碎屑锆石年龄及变凝灰岩单颗粒锆石年龄的研究,其沉积时限被限定在 2168~2059 Ma^[33,36],笔者推测,胡篦型铜矿原生矿化作用同约 2.1 Ga 弧后盆地内中条群的沉积-成岩同时发生。从成矿时代看,胡篦型铜矿和典型的沉积岩型层状铜矿中非刚果-赞比亚铜矿带类似,均经历了与造山带(即中部造山带和泛非 Lufilian 造山带)相关的造山前沉积成岩成矿和造山后变质热液成矿^[67]。

通过对比、总结区域上其他矿床的成矿年龄资料,笔者还发现,中条山地区各个类型的矿床中均发育约 1.85 Ga 的变质热液成矿事件,如本次研究的篦子沟(1825 ± 13 Ma)、南河沟铜矿(1861 ± 14

Ma); Meng 等^[68]通过热液独居石 U-Pb 定年(1832±16 Ma、1810±14 Ma、1809±12 Ma)和黄铁矿 Re-Os 同位素定年(1807±4 Ma)对中条山地区铜矿峪斑岩型铜矿的晚期矿脉测定,认为上述年龄代表其变质热液期矿化年龄; Qiu 等^[18]通过对中条山地区横岭关铜矿的矿脉开展独居石 U-Pb 定年(1863±17 Ma),认为此年龄代表横岭关铜矿变质热液成矿年龄。这些年龄数据说明研究区的各个矿床均受到同期变质热液对成矿的改造。本次研究的基性岩内亦发育此期含矿热液脉(1851±13 Ma),说明此期变质热液流体活动的影响范围较大,不仅存在于各个矿床中,也广泛发育于中条山区域各地质体内,在本区有深远的意义。

6 结 论

(1) 获得篦子沟、南河沟铜矿晚期热液铜矿脉内与金属硫化物共生的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为 1825±13 Ma 和 1861±14 Ma,在误差范围内一致,指示中条山地区胡篦型铜矿的变质热液矿化成矿年龄约为 1850 Ma,形成于古元古代晚期。

(2) 约 1.85 Ga 的变质热液期成矿年龄与中部造山带峰期及退变质作用的时间近乎一致,说明此期成矿事件与碰撞造山关系密切。

(3) 野外地质观察发现,区域上侵入中条群的基性岩内发育含矿石英脉,对脉内与硫化物伴生的白云母进行⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年,获得坪年龄为 1851±13 Ma,说明基性岩中的含矿石英脉与矿区内的变质热液期矿化为同一地质事件的产物,印证碰撞造山过程中产生的变质流体广泛作用于区域内各地质体中,影响范围较大。

致谢:野外工作期间得到山西省地球物理化学勘察院有限公司薛生升工程师的大力支持和帮助,云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 测试和数据的处理过程得到中国地质科学院地质研究所张彦副研究员的指导,审稿专家提出宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 庞雪娇. 山西中条山南和沟、老宝滩铜矿床矿化富集规律及矿床成因探讨[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2010: 10-26.
- [2] 张晗. 山西中条山北段古元古代铜矿成矿作用[D]. 吉林大学博士学位论文, 2012: 35-78.
- [3] 《中条山铜矿地质》编写组. 中条山铜矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 1-184.

- [4] 陶铨. 中条山前寒武纪地层的时代[J]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊, 1985: 12.
- [5] 孙海田, 葛朝华, 冀树楷. 中条山地区前寒武纪地层同位素年龄及其意义[J]. 中国区域地质, 1990, 3: 237-248.
- [6] 孙大中, 李惠民, 林源贤, 等. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究[J]. 地质学报, 1991, (3): 216-231.
- [7] 胡维兴. 关于中条山胡-篦型铜矿床成矿期和成矿时代问题[J]. 华北地质矿产杂志, 1994, (2): 161-166.
- [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-钨年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 1996, (4): 78-86.
- [9] 谭少华. 山西中条山胡-篦型铜矿床成矿地质条件与矿床成因[J]. 西南工学院学报, 1997, (2): 60-63.
- [10] 李文光. 山西省中条山铜矿带胡-篦型矿床成矿构造特征研究[D]. 中南大学硕士学位论文, 2007: 20-36.
- [11] 薛昊日. 山西中条山桐木沟、篦子沟铜矿床地质特征及成矿模式研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2010: 45-69.
- [12] 张亮, 李碧乐, 张晗, 等. 山西中条山桐木沟铜矿床辉钼矿的铼-钨测年及地质意义[J]. 世界地质, 2013, 32(4): 740-746.
- [13] 黄维平, 孙丰月, 张晗, 等. 山西中条山胡篦型铜矿床岩石地球化学特征[J]. 世界地质, 2013, 32(2): 212-220.
- [14] 王子维. 中条山地区胡家峪铜矿床地质特征及成矿动力学背景[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2014: 26-35.
- [15] Jiang Y, Niu H, Bao Z, et al. Fluid evolution of the Paleoproterozoic Hujiayu copper deposit in the Zhongtiao Shan region: evidence from fluid inclusions and carbon-oxygen isotopes [J]. Precambrian Research, 2014, 255: 734-747.
- [16] Qiu Z J, Fan H R, Liu X, et al. Fluid inclusion and carbon-oxygen isotope studies of the Hujiayu Cu deposit, Zhongtiao Mountains, China: Implications for syn-metamorphic copper remobilization [J]. Acta Geol. Sin., 2015, 89(3): 726-745.
- [17] Qiu Z J, Fan H R, Liu X. Mineralogy, chalcopyrite Re-Os geochronology and sulfur isotope of the Hujiayu Cu deposit in the Zhongtiao Mountains, North China Craton: Implications for a Paleoproterozoic metamorphogenic copper mineralization [J]. Ore Geol. Rev., 2016, 78: 252-267.
- [18] Qiu Z J, Fan H R, Liu X. Metamorphic P-T-t evolution of Paleoproterozoic schist-hosted Cu deposits in the Zhongtiao Mountains, North China Craton: Retrograde ore formation during sluggish exhumation [J]. Precambrian Research, 2017, 300: 59-77.
- [19] 耿艳光, 简伟, 李洪英, 等. 中条山篦子沟铜矿辉钼矿铼-钨同位素年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(5): 1405-1418.
- [20] 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.
- [21] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. Precambrian Research, 2005, 136: 177-202.
- [22] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement

- rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 2000, 103: 55–88.
- [23] Wilde S A, Zhao G C, Sun M. Development of the North China Craton during the Late Archean and its final amalgamation at 1.8 Ga: Some speculations on its position within a global Palaeoproterozoic supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2002, 5: 85–94.
- [24] Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan / Hengshan / Fuping terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 577–595.
- [25] Kröner A, Wilde S A, Zhao G C, et al. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for late Palaeoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2006, 146: 45–67.
- [26] Wilde S A, Zhao G C. Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 519–522.
- [27] Zhang J, Zhao G C, Li S Z, et al. Deformation history of the Hengshan Complex: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29: 933–949.
- [28] Trap P, Faure M, Lin W, et al. Late Paleoproterozoic (1900–1800 Ma) nappe stacking and polyphase deformation in the Hengshan – Wutaishan area: Implications for the understanding of the Trans – North – China belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2007, 156: 85–106.
- [29] Trap P, Faure M, Lin W, et al. Contrasted tectonic styles for the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Evidence for a similar to 2.1 Ga thermal and tectonic event in the Fuping Massif [J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30: 1109–1125.
- [30] Wang J, Wu Y B, Gao S, et al. Zircon U–Pb and trace element data from rocks of the Huai'an Complex: New insights into the Late Paleoproterozoic collision between the Eastern and Western blocks of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2010, 178: 59–71.
- [31] 白瑾, 余致信, 戴凤岩, 等. 中条山前寒武纪地质 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1997: 1–143.
- [32] 张瑞英. 华北克拉通南部中条山地区涑水杂岩的组成与演化 [D]. 西北大学博士学位论文, 2015: 36–48.
- [33] 孙大中, 胡维兴. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 31–45.
- [34] 李秋根, 刘树文, 王宗起, 等. 中条山绛县群碎屑锆石 LA-ICPMS U–Pb 测年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(6): 1359–1368.
- [35] 刘玄, 范宏瑞, 邱正杰, 等. 中条山地区绛县群和中条群沉积时限: 夹层斜长角闪岩 SIMS 锆石 U–Pb 年代学证据 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(6): 1564–1572.
- [36] Liu C H, Zhao G C, Sun M, et al. U–Pb geochronology and Hf isotope geochemistry of detrital zircons from the Zhongtiao Complex: Constraints on the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen [J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 159–172.
- [37] 梅华林. 中条山早元古代变质岩石的 *PTi* 轨迹和构造演化 [J]. *地质论评*, 1994, 40(1): 36–47.
- [38] Sun D Z, Hu W X, Tang M. Origin of Late Archean and Early Proterozoic rocks and associated mineral deposits from the Zhongtiao Mountains, East-Central China [J]. *Precambrian Research*, 1990, 47 (3/4): 287–306.
- [39] 陈文, 张彦, 金贵善, 等. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar–Ar 热年代学证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 867–872.
- [40] 张彦, 陈文, 陈克龙, 等. 成岩混层 (I/S) Ar–Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 *P–T* 界线粘土岩为例 [J]. *地质论评*, 2006, 52(4): 556–561.
- [41] Brenan J M, Cherniak D J, Rose L A. Diffusion of osmium in pyrrhotite and pyrite: Implications for closure of the Re–Os isotopic system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 180(3/4): 399–413.
- [42] Peng J T, Zhou M F, Hu R Z, et al. Precise molybdenite Re–Os and mica Ar–Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(7): 661–669.
- [43] Yuan S D, Peng J T, Shen N P, et al. ^{40}Ar – ^{39}Ar isotopic dating of the Xianghualing Sn–polymetallic orefield in southern Hunan, China and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 278–286.
- [44] 袁顺达, 侯可军, 刘敏. 安徽宁芜地区铁氧化物–磷灰石矿床中金云母 Ar–Ar 定年及其地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(3): 797–808.
- [45] Purdy J W, Jäger E. K–Ar Ages on Rocks Forming Minerals from the Central Alps [C] // *Memorie degli Istituti di Geologiae Mineralogia dell' Università di Padova*, 1976, 30: 1–321.
- [46] 袁顺达, 张东亮, 双燕, 等. 湘南新田岭大型钨钼矿床辉钼矿 Re–Os 同位素测年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 27–38.
- [47] 华杉, 薛生升. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素体系及其在地质中的应用 [J]. *资源环境与工程*, 2013, 27(2): 204–210.
- [48] Selley D, Broughton D, Scott R, et al. A new look at the geology of the Zambian Copperbelt [C] // *Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005: 965–1000.
- [49] Volodin R N, Chechetkin V S, Bogdanov, et al. The Udokan cupriferous sandstones deposit (eastern Siberia) [J]. *Geol. Ore Dep.*, 1994, 36: 1–25.
- [50] Sawlowicz Z. REE and their relevance to the development of the Kupferschiefer copper deposit in Poland [J]. *Ore Geol. Rev.*, 2013, 55: 176–186.
- [51] Richards J P, Krogh T E, Spooner E T C. Fluid inclusion characteristics and U–Pb rutile age of late hydrothermal alteration and veining at the Musoshi stratiform copper deposit, Central African Copper Belt, Zaire [J]. *Economic Geology*, 1988, 83: 118–139.
- [52] Guo J H, O'Brien P J, Zhai M G. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Metamorphic evolution, *P–T* paths and geotectonic significance [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2002, 20: 741–756.

- [53] Guo J H, Sun M, Chen F K, et al. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 629-642.
- [54] Liu S W, Pan Y M, Li J H, et al. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2002, 117: 41-56.
- [55] Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes[J]. *Precambrian Research*, 2004, 130: 229-249.
- [56] Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping Complex: Implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 643-658.
- [57] Liu S W, Zhao G C, Wilde S A, et al. Th-U-Pb monazite geochronology of the Luliang and Wutai complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 2006, 148: 205-224.
- [58] Kusky T M, Li J H. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22: 383-397.
- [59] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, et al. Geochemical ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological and Sr-Nd isotopic constraints on the origin of Paleoproterozoic mafic dikes from the southern Taihang Mountains and implications for the ca.1800Ma event of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2004, 135: 55-77.
- [60] Wang Y J, Zhao G C, Fan W M, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dykes from western Shandong Province: Implications for back-arc basin magmatism in the Eastern Block, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2007, 154: 107-124.
- [61] Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, et al. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 523-545.
- [62] Li J H, Kusky T M. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 47-66.
- [63] Guan H, Sun M, Wilde S A, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2002, 113: 1-18.
- [64] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 2002, 302: 191-226.
- [65] 刘超辉, 刘福来, 赵国春. 华北克拉通中部造山带早元古代盆地演化[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2770-2784.
- [66] Zhang J, Zhao G C, Li S Z, et al. Polyphase deformation of the Fuping Complex, Trans-North China Orogen: Structures, SHRIMP U-Pb zircon ages and tectonic implications [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31: 177-193.
- [67] Selley D, Broughton D, Scott R, et al. A new look at the geology of the Zambian Copperbelt[C]//Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005: 965-1000.
- [68] Meng X Y, Richards J, Mao J W. The Tongkuangyu Cu Deposit, Trans-North China Orogen: A Metamorphosed Paleoproterozoic Porphyry Cu Deposit[J]. *Economic Geology*, 2020, 115, 51-77.
- ①叶会寿, 李洪英, 毕珉锋, 等.《重要矿种关键问题调查与矿产地质专题填图试点》项目内部报告. 2018.