

文章编号: 0258-7106 (2014) 06-1366-13

冀东唐杖子金(钼)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄*

李正远¹, 叶会寿^{2**}, 贺文¹, 曹晶¹, 张兴康¹, 王赛¹, 路东宇¹, 李超³

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 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开放实验室, 北京 100037; 3 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘 要 冀东唐杖子金(钼)矿床地处华北陆块北缘燕山造山带的东段, 该区主要出露太古宙和中-新元古代地层, 岩浆岩主要为中生代花岗斑岩。钼矿体主要产于隐爆角砾岩中, 辉钼矿呈浸染状、薄膜状、网脉状和胶结物产出; 金矿体产于隐爆角砾岩和断裂带中, 矿化类型有隐爆角砾岩型、石英脉型和构造蚀变岩型。为了厘定唐杖子金(钼)矿床的成矿时代、成矿物质来源, 以及与区域上金矿的关系, 笔者采用辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法, 获得 6 件辉钼矿样品的模式年龄主要介于 $(168.1 \pm 2.5) \text{ Ma} \sim (171.5 \pm 2.8) \text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $(170.0 \pm 1.0) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.80$), 等时线年龄为 $(170.1 \pm 1.6) \text{ Ma}$, 表明唐杖子金(钼)矿床和矿区花岗斑岩均形成于中侏罗世, 成矿物质来源为壳幔混源, 同区域上峪耳崖、牛心山等金矿床的成矿时代一致, 是华北陆块北缘早燕山期大规模岩浆活动-成矿作用的产物。中侏罗世花岗质岩浆沿 F_1 主干断裂侵入, 在顶部岩层发生隐爆, 形成潜火山机构, 成矿流体沿角砾岩筒及断裂系统迁移、富集、成矿。唐杖子金(钼)矿床为与花岗斑岩-隐爆角砾岩侵入有关的隐爆角砾岩型钼金矿-脉状金矿床。

关键词 地球化学; 矿床特征; Re-Os 同位素年龄; 辉钼矿; 唐杖子; 冀东

中图分类号: P618.51; P618.65

文献标志码: A

Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit in eastern Hebei Province

LI ZhengYuan¹, YE HuiShou², HE Wen¹, CAO Jing¹, ZHANG XingKang¹, WANG Sai¹,
LU DongYu¹ and LI Chao³

(1 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 2 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract

The Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit is located in eastern Yanshan orogenic belt of the North China Craton. Archean and Meso-Neoproterozoic strata are exposed in this area, and the magmatic rocks are mainly the Mesozoic granite, controlled by the subvolcanic apparatus. The molybdenum orebodies are hosted in the cryptoexplosion breccia, and the molybdenite occurs in the forms of dissemination, lamination, stockwork and cements. The gold orebodies mainly occur in the cryptoexplosion breccia and the fault zone. The gold ores have

* 本文得到国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室开放研究项目(编号: ZS1309)和地质大调查项目(编号: 1212011220492)联合资助

第一作者简介 李正远, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: 157019112@qq.com

** 通讯作者 叶会寿, 男, 1964 年生, 研究员, 从事矿床研究与资源勘查评价工作。Email: yehuishou@163.com

收稿日期 2014-08-31; 改回日期 2014-10-11。秦思婷编辑。

three different types, namely cryptoexplosive breccia type, polymetallic sulfide-quartz vein type and tectonic altered rock type. In order to determine the metallogenic epoch of gold and molybdenite, source of ore-forming materials and the relationship of this deposit with the gold deposits in this area, the authors selected six molybdenite-bearing samples from breccia for precise Re-Os dating by using ionic mass spectrographs as inductance coupling and, as a result, yielded model ages ranging from (168.1 ± 2.5) Ma to (171.5 ± 2.8) Ma, with a weighted mean age of (170.0 ± 1.0) Ma (MSWD=0.80) and an isochron age of (170.1 ± 1.6) Ma. These data indicate that the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit formed in the middle Jurassic, consistent with the age of granite porphyry and the metallogenic epoch of the Yuerya and Niuxinshan gold deposits. The ore-forming metals were derived from the mixture of the crust and the mantle, and the ore deposit was a product of early Yanshanian large-scale mineralization on the northern margin of the North China Craton. Granitic magma invaded along the main fracture F_1^4 in Middle Jurassic and cryptoexplosion took place at the top of the strata, forming subvolcanic apparatus. Ore-forming fluid migrated, concentrated and resulted in mineralization along the cryptoexplosion breccia pipe and fracture system. The Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit belongs to cryptoexplosive breccia molybdenum-gold-vein type gold deposit connected with granite porphyry-cryptoexplosive breccia apparatus.

Key words: geochemistry, deposit characteristics, Re-Os isotopic age, molybdenite, Tangzhangzi, eastern Hebei

华北陆块北缘冀东地区已发现和探明金矿床(点)197处,是中国重要的金矿集中区之一(赵海玲等,2001;李俊建等,2002)。其中,特大型金矿1处(金厂峪金矿)、大型金矿3处(峪耳崖、尖宝山、洞子沟金矿床)、中型金矿4处(牛心山、山家湾子、三家、高家店金矿床)(李俊建等,2004)。该区金矿床的形成与花岗岩在时间和空间上都具有明显的成因联系,金矿床主要围绕花岗岩体分布,如金厂峪金矿位于青山口岩体附近、华尖金矿位于牛心山岩体附近、峪耳崖金矿产于峪耳崖岩体中,这些岩体均形成于早燕山期(林尔为等,1985;许毓奇,1990;张秋生等,1991;曲以秀,1993;邓晋福等,1999;罗镇宽等,2001;毛景文等,2005;郭少丰等,2009;陆继龙等,2012)。该区金矿类型众多,主要有石英脉型(秦大军等,1997;宋扬等,2012)、构造蚀变岩型(孙爱群等,2002;张艳春等,2003)和隐爆角砾岩型(沈保丰等,2002;王宝德等,2002)。唐杖子金(钼)矿床位于河北省承德市宽城满族自治县,自上世纪60年代以来,多家地勘单位在该区开展了找矿勘查工作,在花岗斑岩-隐爆角砾岩体、断裂带中都找到了钼矿体和金矿体。目前,对该矿床的研究程度相对较低,郭少丰等(2009)对唐杖子花岗斑岩开展了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,获得年龄值为 173 Ma,尹利君等(2013)认为唐杖子金矿属角砾岩筒型金矿床;但对于成矿时代、成矿物质来源、成矿作用特征以及与区

域上峪耳崖、下房营等金矿床的关系等问题仍缺乏研究。笔者在对唐杖子矿床地质特征研究的基础上,选取6件辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素测年,旨在厘定成矿时代、查明成矿物质来源,为冀东地区寻找同类型的矿床提供依据。

1 成矿地质背景

冀东地区地处华北陆块北缘燕山造山带的东段,大面积出露太古宙和中-新元古代地层。太古宇主要为一套深变质岩系,岩性为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、麻粒岩等,遭受强烈的混合岩化。中-上元古界主要为一套巨厚的陆源碎屑-碳酸盐沉积建造,岩性主要为砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、白云岩等。古生界出露局限,岩性以浅海相和海陆交互相沉积岩为主,但受断裂构造的影响,层位出露不全。中侏罗统主要分布于寿王坟-宽城中生代断陷盆地中,为一套安山质熔岩和安山质凝灰岩组成的火山-沉积岩系(图1)。

研究区处于 EW 向喜峰口-青龙区域性断裂带、NE 向金厂峪-峪耳崖-汤道口断裂带和 NW 向冷口-小马坪-华尖断裂带构造交汇复合部位,具有良好的成矿地质构造条件(吴珍汉等,1998;崔盛芹等,2000;翁文灏,1929;赵越,1999;赵越等,2004)。

区内岩浆活动具有多旋回、多期多阶段性,岩石

类型多样和成因复杂等特点(陈昌勇,1998)。其中,印支期和燕山期岩浆活动最为强烈,岩性以花岗岩类岩石为主(图 1)。印支期花岗岩体主要分布于该区东北部都山一带。燕山期花岗岩体全区均有分布,但在中部及东部峪耳崖、牛心山等地出露较多,成岩时代 199~172 Ma(张秋生等,1991;罗镇宽等,2001;郭少丰等,2009),与区内的金、钼多金属矿床在时间、空间和成因上密切相关(芮宗瑶等,1984;裴荣富等,1998)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地层

矿区主要出露地层为中元古界长城系常州沟组(Chc)和串岭沟组(Chch)(图 2)。常州沟组分布于矿区中南部,下段以砾岩、含砾砂岩、石英砂岩为主,巨厚层状,分选性较差,交错层理发育;中段以粉砂

岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及砂质页岩为主,偶见泥质粉砂岩与石英砂岩呈薄层状,互层产出;上段以灰白色厚层-巨厚层石英砂岩为主。串岭沟组分布于矿区北部,下段为灰白色、黑紫色薄层含铁质石英细砂岩;中、上段为灰绿色砂质页岩,黑色页岩,夹薄层泥质细砂岩。

2.2 岩浆岩

矿区出露辉绿岩脉、花岗斑岩和流纹斑岩脉。辉绿岩脉分布于矿区中东部,沿 NEE 向主断裂带(F₁)充填,矿区出露长约 1200 m,宽一般为 30~80 m(图 2)。岩脉走向 70°,倾向 SSE,倾角 65°。岩石呈灰绿色,块状构造,辉绿结构。主要矿物为斜长石(含量 50%~55%)、角闪石(含量 35%~40%)、黑云母(含量 5%),副矿物有磷灰石、榍石、锆石等。由于热液作用,辉绿岩发生了不同程度的蚀变,石英含量逐渐增加,暗色矿物含量逐渐减少,形成蚀变辉绿岩。辉绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(721±

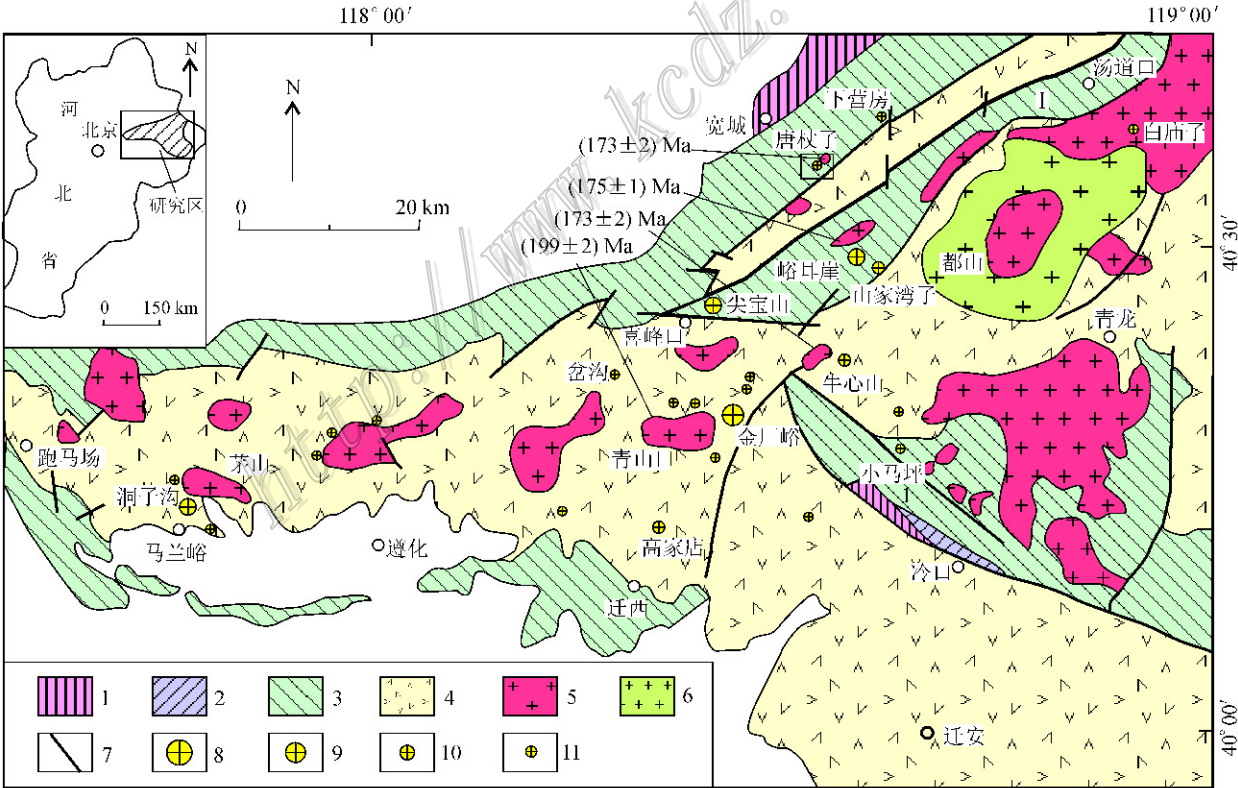


图 1 冀东地区区域地质简图(据李俊建等,2002 修改)

1—中侏罗统; 2—古生界; 3—中-上元古界; 4—太古宙遵化-青龙变质杂岩; 5—燕山期花岗岩; 6—印支期花岗岩; 7—断裂;
8—特大型金矿床; 9—大型金矿床; 10—中型金矿床; 11—小型金矿床

Fig. 1 Simplified regional geological map of east Hebei (modified after Li et al., 2002)

1—Middle Jurassic; 2—Paleozoic; 3—Mesoproterozoic-Neoproterozoic; 4—Archean Zunhua-Qinglong metamorphic rock; 5—Yanshanian granite; 6—Indo-Chinese granite; 7—Fault; 8—Superlarge gold deposit; 9—Large gold deposit; 10—Medium-sized gold deposit; 11—Small gold deposit

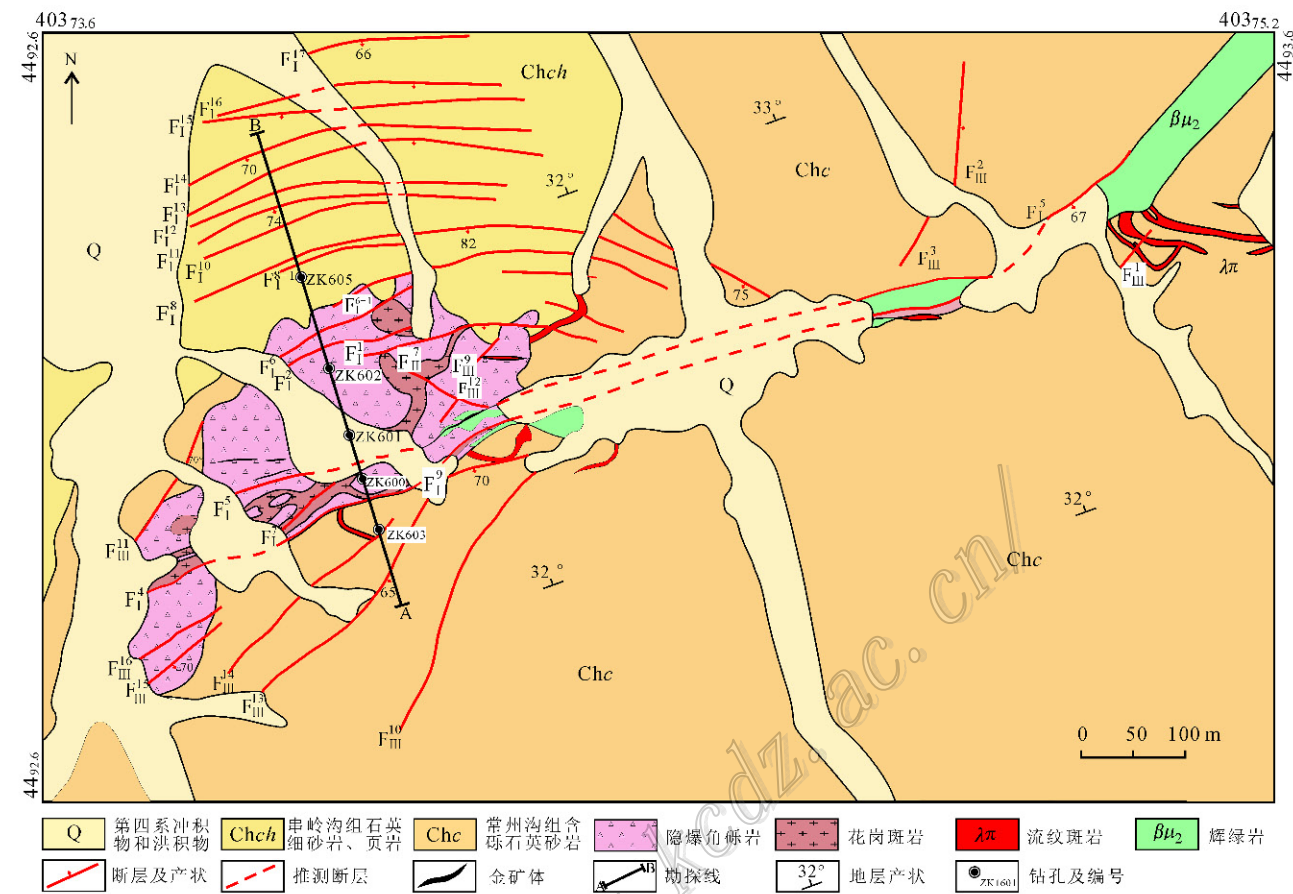


图 2 唐杖子金(钼)矿区地质图(据叶会寿等,2013)

Fig. 2 Geological sketch map of the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit (modified after Ye et al., 2013)

5) Ma(贺文等,2013),即形成于新元古代震旦纪。

花岗斑岩沿 NEE 向主断裂带(F_1^I)侵入,呈岩枝(株)状产出,出露面积 0.05 km²(图 2),经钻孔揭露,岩体向深部变大,与围岩呈侵入接触关系。岩体顶部围岩常州沟组上段厚层石英砂岩经接触变质形成致密块状的石英岩,由于该层石英岩的屏蔽作用,使得流体聚集,岩浆爆破应力大于岩浆顶部岩层压力时,造成围岩隐爆形成角砾岩筒。花岗斑岩呈浅肉红色,块状构造,斑状结构(图 3a、b),斑晶含量 20%,主要为钾长石、石英、斜长石。其中,石英边部浑圆,熔蚀现象明显,钾长石多已强烈高岭土化,斜长石发生绢云母化,黑云母蚀变成白云母和铁质矿物。基质具微细粒花岗结构,由微细粒石英和长石类矿物组成,副矿物有金红石、磁铁矿、榍石、锆石等。岩石属钙碱性系列,具有高硅、富碱和高钾的特点,属 I 型花岗岩(郭少丰等,2009;赵成合等,2009)。花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(173 ± 2) Ma(郭少丰等,2009),形成于中侏罗世。

流纹斑岩主要分布于隐爆角砾岩筒外围及矿区的东部,呈脉状分布,规模较小(图 2)。岩石呈肉红色,流纹构造,斑状结构,矿物主要有石英、长石,可见长石定向排列,岩石风化严重,无明显矿化。

2.3 矿区构造

矿区出露潜火山机构,由隐爆角砾岩筒、NEE 向主断裂带、环形断裂带和 NE 向断裂带组成(图 2)。

2.3.1 角砾岩筒

角砾岩筒分布于矿区中西部,平面上呈不规则的椭圆形,长轴方向呈 NEE 向,与 F_1^I 主断裂带方向一致,出露面积 0.08 km²。剖面呈筒状,与围岩接触界线分明,倾向 SE,倾角较陡(图 4)。角砾岩具有明显的水平分带现象,但垂直分带则不明显(赵成合等,2009)。水平方向上,自外向中心,依次为震碎角砾岩带、坍塌角砾岩带、中心角砾岩带。

震碎角砾岩带 分布于角砾岩筒的边部,与未震碎的围岩界线清楚,由于岩浆隐爆作用,围岩岩石呈碎裂状或角砾状,可拼性较强,胶结物主要为岩

屑、岩粉(图 3c),一般不含矿。

坍塌角砾岩带 位于震碎角砾岩带与中心角砾岩带之间,角砾成分随围岩的岩性不同而有所差异。角砾一般较大,多在数十厘米至 1 m,呈棱角状,分布杂乱,细碎屑胶结物质较少,呈接触式胶结。角砾堆积紧密,无明显位移,可见原始层理,含矿性较差。

中心角砾岩带 角砾大小不一,由几毫米到数十厘米不等,呈棱角状或不规则状,有的具熔蚀边结构。角砾成分复杂,既有石英砂岩、细砂岩、泥质岩等围岩,也有中-基性脉岩、花岗斑岩、早期隐爆砾岩等,反映出具有多次隐爆的特点。胶结物除原岩的

岩屑、岩粉外,主要为热液矿物(图 3d)。若胶结角砾的热液矿物为黄铁矿、黄铜矿、自然金、石英、绿泥石、绢云母、方解石等,往往形成金矿石(图 3e),多分布于中心角砾岩带上部。若为辉钼矿、石英、绿泥石、方解石等胶结,通常形成钼矿石(图 3f),多分布于中心角砾岩带下部,靠近花岗斑岩;另外,在花岗斑岩体上部还发育少量的熔结角砾岩(图 3d)。

2.3.2 NEE 向主断裂带(F_1^1 、 F_1^2)

NEE 向主断裂带(又称中部构造群)由 F_1^1 、 F_1^2 断裂带及其分支断裂组成,延伸较大,为矿区的主干断裂,也是区内主要的控岩控矿构造,沿断裂带发育辉

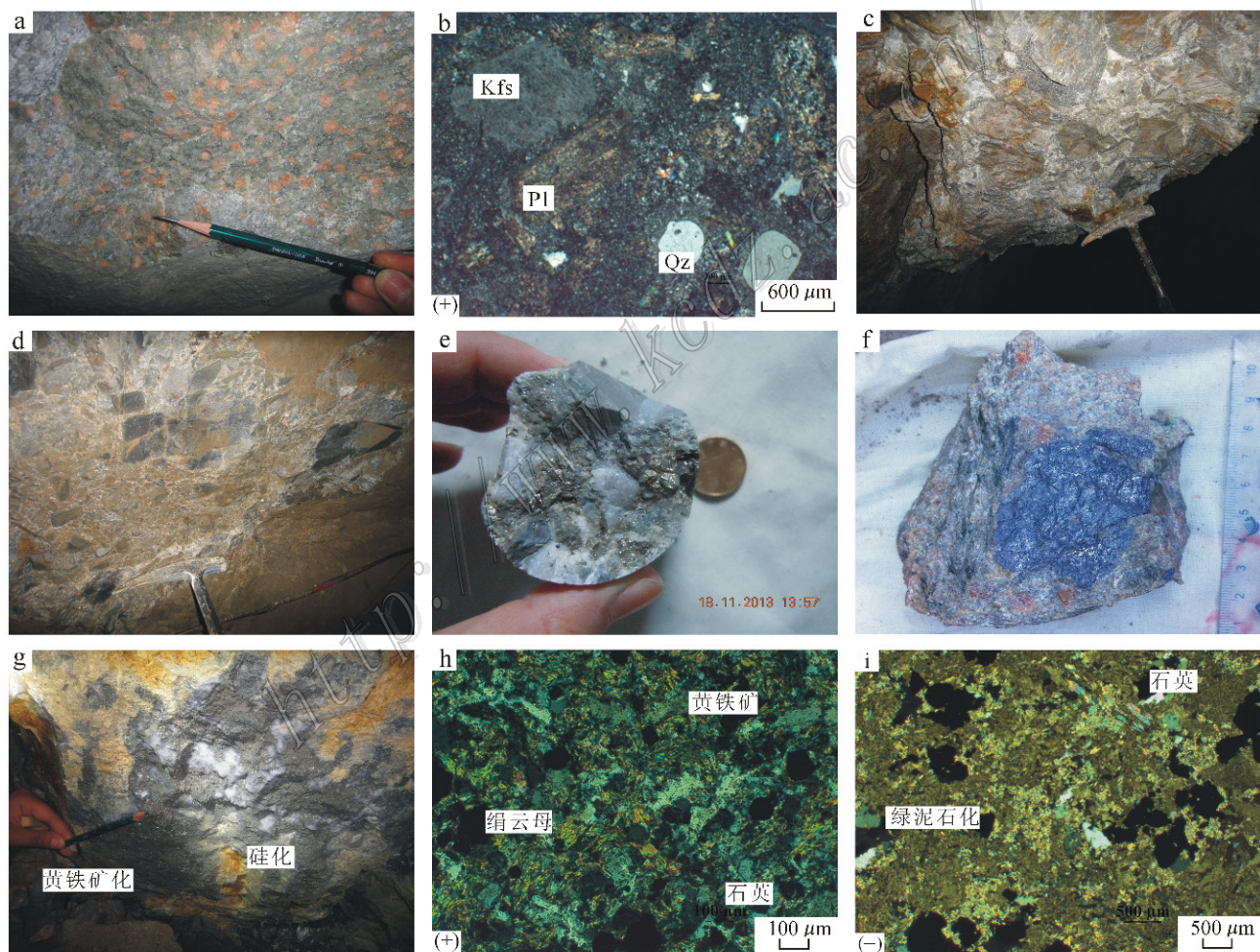


图 3 唐杖子金(钼)矿床野外及镜下照片

- a. 花岗斑岩; b. 花岗斑岩,斑晶为钾长石、斜长石、石英; c. 隐爆角砾岩; d. 熔结角砾岩; e. 隐爆角砾岩型金矿石; f. 隐爆角砾岩型钼矿石,辉钼矿呈薄膜状; g. 黄铁矿化和硅化; h. 金矿脉中发育的黄铁绢英岩化; i. 绿泥石化

Fig. 3 Field and microscopic photos of the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit

- a. Granite; b. Granite, potash feldspar, plagioclase and quartz constituting the phenocrysts; c. Cryptoplosion breccia; d. Welded breccia; e. Cryptoplosion breccia type gold ore; f. Cryptoplosion breccia type molybdenum ore; g. Pyritization and silicification; h. Beresitization in gold lode; i. Chloritization

主要发育在 F₁ 主干断裂带上盘地层中,长几十米到 400 m,宽 0.3~1 m,走向 30~50°,倾向 SE,倾角 60~80°。由碎裂岩组成,一般不含矿,该组断裂

带表现出张扭性的特点,属主干断裂的次级构造。

2.4 矿体特征

2.4.1 钼矿体

钼矿体位于1~6勘探线之间的隐爆角砾岩筒中(图4),为隐伏盲矿体。矿体走向 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$,倾向SE,倾角 $52^{\circ}\sim 62^{\circ}$,矿体沿走向不连续,沿倾向厚度、品位变化较大。其中,2号钼矿体断续延长193 m,厚 $3.45\sim 6.18$ m,平均厚度5.0 m,矿体向上急剧尖灭,向下膨大。矿石类型为隐爆角砾岩型(图3f)。查明钼金属量47 t,平均品位0.072%。

2.4.2 金矿体

金矿体产于断裂带和隐爆角砾岩中,矿体(脉)的空间分布具有一定的规律性:围绕岩体及角砾岩筒的矿体规模较大,走向长,延深大;距岩体越远,矿脉和矿体规模越小。根据矿体的产出部位和空间分布位置,结合断层构造群特征,将矿带分为中矿带、北矿带(图2、图4)。

(1) 中矿带

分布于矿区中部,主要矿体有4、4-1、4-2号矿体,产于 F_1^1 、 F_1^2 断裂带中,平面上呈帚状,东段收敛,向西散开,剖面上呈叠瓦状排列,无侧伏现象。

4号矿体 赋存于 F_1^1 断裂中,位于6~26勘探线之间,赋存标高510~325 m之间。矿体走向 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,倾向SE,倾角 70° 。矿体在地表呈断续分布,但坑道及钻探工程揭露矿体深部较为连续,呈透镜状分布。矿体长约300 m,厚度 $0.44\sim 1.79$ m,矿石类型为黄铁矿化蚀变岩型,金品位 $1.05\sim 20.26$ g/t。

4-1号矿体 位于3~28勘探线之间,赋存于 F_1^2 断裂带中,赋存标高570 m(地表)~295 m,总体走向 70° ,倾向SSE,倾角 $66^{\circ}\sim 72^{\circ}$,为矿区规模最大的金矿体,约占全区金属量的64%。矿体呈似层状、透镜状产出,长约575 m,平均厚度0.73 m,平均品位7.58 g/t。矿石类型主要为多金属硫化物蚀变岩型,局部可见石英脉型。

4-2号矿体 位于8~20勘探线之间,赋存标高240~465 m之间,且矿体夹于4号和4-1号矿体之间,并与之平行。总体走向 70° ,倾向SSE,倾角 $66^{\circ}\sim 78^{\circ}$,呈透镜状产出。矿体长200余 m,平均厚度1.3 m,平均品位3.2 g/t。矿石类型为含金石英脉、矿化蚀变岩型。

(2) 北矿带

出露于矿区北部,受环形断裂带控制,包括1条银矿脉和12条金矿脉,矿脉间距在20~40 m不等。

矿脉呈弧形,走向 $340^{\circ}\sim 20^{\circ}$,倾向S,倾角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,上部陡倾,下部略缓。矿体走向长度220~480 m不等,厚1~1.5 m,由于探矿工程较少,矿体规模未控制。矿石类型有构造蚀变岩型、石英脉型。金品位 $2.1\sim 10$ g/t,银品位135 g/t,铅品位最高可达12.1%。越靠近岩体的矿脉,矿化越强。

2.5 矿石特征

原生矿石根据矿石的矿物共生组合、结构、构造等特征,钼矿石类型主要为隐爆角砾岩型;金矿石类型可划分为石英脉型、多金属硫化物蚀变岩型、隐爆角砾岩型。

隐爆角砾岩型钼矿石 分布于隐爆角砾岩筒的下部,呈浅肉红色-灰白色,具细脉状、浸染状结构,角砾状构造(图3f)。金属矿物主要为辉钼矿、黄铁矿,辉钼矿亮灰色,金属光泽,多呈星点状、浸染状或与热液石英、黄铁矿以细脉形式产出,亦可与岩粉或长英质矿物呈胶结物胶结角砾。脉石矿物主要为石英、钾长石、斜长石、方解石等。

隐爆角砾岩型金矿石 分布于隐爆角砾岩筒中,呈灰白色,具半自形-他形粒状结构,角砾状构造。角砾成分复杂,角砾被热液矿物和岩粉、岩屑胶结,金属矿物主要有黄铁矿,少量的黄铜矿和方铅矿,呈他形粒状、不规则的细脉状或粒状集合体分布。

石英脉型金矿石 分布于断裂构造带中,呈灰白色-烟灰色,半自形-他形粒状结构,脉状构造。金属矿物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿、方铅矿、(银)黝铜矿等,呈星点状、浸染状、团斑状分布于石英脉中。脉石矿物主要为石英,不规则脉状产出,脉宽0.1~5 cm。

多金属硫化物蚀变岩型金矿石 分布于断裂构造带中,呈灰白色,具中细粒粒状结构,星散浸染状、细脉浸染状构造。金属矿物有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等;脉石矿物主要为石英。黄铁矿呈半自形-他形粒状结构,以颗粒集合体或单体颗粒形式分布于石英及其他金属矿物中。方铅矿、闪锌矿、黄铜矿呈他形粒状、浸染状、团块状分布。

2.6 围岩蚀变

唐杖子金钼矿床围岩蚀变普遍发育。与钼矿化有关的围岩蚀变主要有钾长石化、硅化、绢云母化、碳酸盐化,分布于角砾岩筒中。钾长石化主要呈面状分布在花岗岩与隐爆角砾岩的接触带附近,多与硅化伴生。硅化与碳酸盐化多分布于角砾岩的胶结

物中。与金矿化有关的围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化(图 3g)、绢云母化、黄铁绢英岩化(图 3h)、绿泥石化(图 3i)、碳酸盐化等。其中,黄铁矿化、硅化与金矿化关系最为密切,黄铁矿分布于石英脉的两侧或者蚀变岩中,硅化主要呈细网脉状分布于两侧围岩中。蚀变强度一般随着远离矿体(带)或断裂破碎带而减弱,蚀变类型随围岩岩性的不同,发育程度亦有明显差异。

2.7 成矿期次与成矿阶段

根据矿脉穿插关系、矿物共生组合和矿石结构构造等,可将成矿作用过程划分为热液成矿期和表生成矿期。

热液成矿期可进一步划分为钼矿成矿亚期和金矿成矿亚期。其中,钼矿成矿亚期可划分为 3 个成矿阶段:第 I 阶段为钾长石化阶段,以出现钾长石化、硅化(图 5a)为特征;第 II 阶段为石英-辉钼矿阶段(图 5b),是钼矿的主成矿阶段,以辉钼矿大量出现

为特征,主要形成星点状、浸染状辉钼矿和细脉-网脉状辉钼矿石英脉;第 III 阶段为碳酸盐阶段,以形成大量的方解石为特征(图 5c)。

金矿成矿亚期划分为 4 个阶段:第 I 阶段为黄铁矿-石英脉阶段,形成星点状半自形-自形晶黄铁矿石英脉(图 5d)、硅化蚀变岩、黄铁矿化硅化隐爆角砾岩;第 II 阶段为石英-黄铁矿阶段,早期乳白色石英脉或硅化蚀变岩受力破碎形成微裂隙、构造角砾岩,被含矿热液充填交代,形成烟灰色微细粒他形粒状黄铁矿石英脉和矿化蚀变岩,金矿化较强;第 III 阶段为石英-多金属硫化物阶段,以形成方铅矿、闪锌矿、黄铜矿脉为特征(图 5e、f);第 IV 阶段为石英-碳酸盐阶段,是成矿晚期阶段,多沿石英脉的两侧或蚀变岩中的裂隙形成石英铁白云石细脉、方解石细脉和团块,金属矿物极少。

根据上述矿床的特征,唐杖子矿床属于隐爆角砾岩型金钼矿-脉状金矿床。

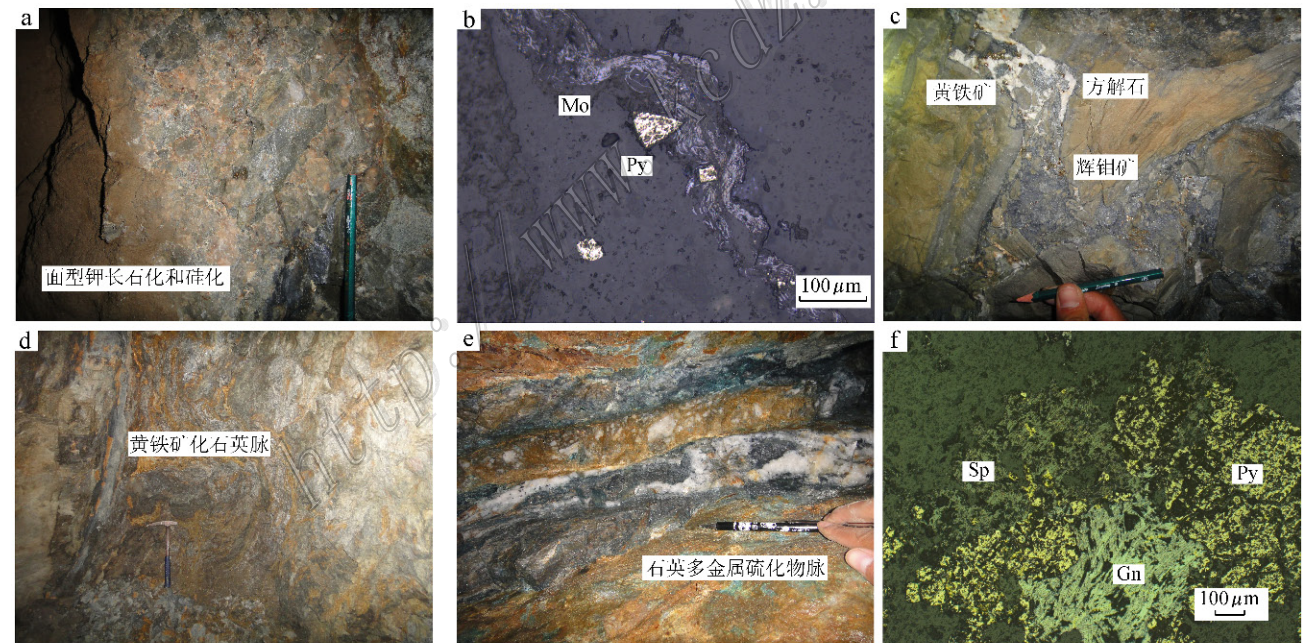


图 5 唐杖子金(钼)矿床矿化阶段及产物

- a. 钾长石化阶段发育的面型钾长石化和硅化; b. 第二阶段的细脉状辉钼矿分布于隐爆角砾岩的胶结物中; c. 第二阶段的石英辉钼矿脉叠加第三阶段的碳酸盐脉; d. 含黄铁矿石英脉; e. 石英多金属硫化物脉; f. 方铅矿和闪锌矿交代黄铁矿(反射)
- Fig. 5 Mineralization stages and products of the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit
- a. Massive K-feldspathization and silicification at the K-feldspathization stage; b. Molybdenum vein of stage II distributed in the cements of cryptoplosion breccia; c. Quartz-molybdenum vein of stage II overlapped by carbonate vein of stage III; d. Quartz bearing pyrite; e. Quartz polymetallic sulfide vein; f. Galena and sphalerite replacing pyrite (reflected light)

表 1 唐杖子金矿中辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果

Table 1 Re-Os isotope data for molybdenite from the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit

样品名称	m/g	w(Re)/μg/g		w(普 Os)/ng/g		w(¹⁸⁷ Re)/μg/g		w(¹⁸⁷ Os)/ng/g		年龄/Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
B13	0.00504	31.59	0.30	0.1055	0.0742	19.86	0.19	55.92	0.60	168.8	2.8
B17	0.01009	25.16	0.22	0.7563	0.0486	15.82	0.14	44.86	0.40	170.0	2.5
B18	0.01012	27.17	0.25	0.7918	0.1181	17.08	0.16	47.88	0.43	168.1	2.5
B6772	0.02030	41.67	0.45	0.0577	0.0585	26.19	0.28	74.94	0.66	171.5	2.8
B21	0.00705	12.56	0.11	0.0660	0.0678	7.89	0.07	22.35	0.20	169.8	2.5
B6770	0.01014	269.50	2.30	0.9512	0.7334	169.40	1.50	481.10	4.10	170.2	2.5

测试单位：国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室；分析者：李超，曾法刚。

3 辉钼矿样品采集及测试方法

用于 Re-Os 同位素测年的 6 件辉钼矿样品均来自唐杖子金(钼)矿竖井 370 m 中段,属石英-辉钼矿阶段,辉钼矿呈薄膜状、细脉状-网脉状、星点状分布于隐爆角砾岩中。辉钼矿样品经过无污染粉碎、浮选、重液等方法处理,并在双目镜下挑选,最终得到纯度大于 98% 的辉钼矿粉末。

辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。测试仪器为美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪(TJA X-series ICP-MS),采用 Carius tube 熔样法,所用 ¹⁸⁵Re 和 ¹⁹⁰Os 的稀释剂来自美国橡树岭国家实验室。具体分析方法及操作步骤详见相关文献(杜安道等, 1994; 2001; Du et al., 2004; Shirey et al., 1995; Stein et al., 1997; 1998; Markey et al., 1998; 毛景文等, 2004)。本次试验中 Re、Os 和 ¹⁸⁷Os 空白水平分别为 0.0043 ng(不确定度 0.0022)、0.000 09 ng(不确定度 0.000 08)和 0.000 42(不确定度 0.000 18),远小于样品含量,故不会影响实验中铼、钨含量的测定。

4 测试结果

辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果见表 1。辉钼矿 w(Re)为 12.56~269.50 μg·g⁻¹, w(¹⁸⁷Re)为 7.89~169.40 μg·g⁻¹, w(Os)为 0.0577~0.9512 μg·g⁻¹, w(¹⁸⁷Os)为 22.35~481.10 μg·g⁻¹。模式年龄计算公式为: $t = 1/\lambda [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$, 其中,衰变常数 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1} (\pm 1.02\%)$ (Smo-liar et al., 1996)。6 件样品的模式年龄为 (168.1 ± 2.5) Ma~(171.5 ± 2.8) Ma, 加权平均年龄为 (170.0

± 1.0) Ma (MSWD = 0.80) (图 6)。采用 Isoplot 软件对 6 组数据进行等时线计算, 获得等时线年龄为 (170.1 ± 1.6) Ma (MSWD = 1.3) (图 7)。

5 讨论

5.1 成矿时代

本次工作测得唐杖子金(钼)矿床中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (170.1 ± 1.6) Ma, 代表了唐杖子矿床金钼成矿作用的年龄。该年龄与矿区花岗斑岩的侵入年龄 (173 Ma, 郭少丰等, 2009) 基本一致, 表明唐杖子矿床的金钼成矿作用与岩浆活动密切相关, 均发生于中侏罗世, 为同一岩浆-构造-流体活动的产物。

冀东地区金矿床绝大部分形成于中生代, 无论在时间上还是空间上与燕山期花岗岩都具有明显的成因联系。如金厂峪金矿床形成年龄为 170 Ma (贾三石等, 2011), 矿区花岗岩的年龄为 187 Ma (张秋生等, 1991); 峪耳崖金矿床形成年龄为 177 Ma (吴珍汉, 1991), 与花岗斑岩密切相关的钼矿化年龄为 (172 ± 3) Ma (陈绍聪, 待刊), 矿区灰白色花岗岩的年龄为 (175 ± 1) Ma、肉红色花岗岩的年龄为 (174 ± 3) Ma (罗镇宽等, 2001); 牛心山金矿脉的年龄为 176 Ma (李颖等, 1999), 矿区花岗岩年龄为 172 Ma 左右 (罗镇宽等, 2001; 郭少丰等, 2009); 山家湾子金矿床形成年龄为 177 Ma (吴珍汉等, 1998); 岔沟金矿床形成年龄 166 Ma (余昌涛, 1989); 华尖金矿床形成年龄 147 Ma (吴珍汉, 1991) 等。由前述可知, 冀东地区金矿床形成于中生代, 与燕山期花岗岩关系十分密切, 为早燕山期燕辽地区大规模岩浆侵入活动和金钼多金属成矿事件的组成部分。

5.2 成矿物质来源

前人研究表明, Re 倾向富集于地幔或基性、超

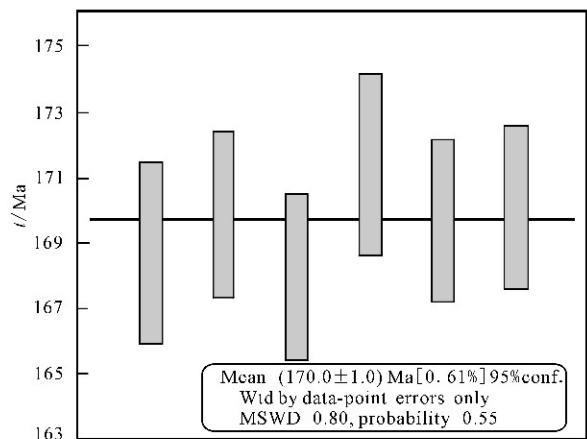


图 6 唐杖子金（钼）矿床辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值
Fig. 6 Weighted mean of Re-Os model for molybdenite from the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit

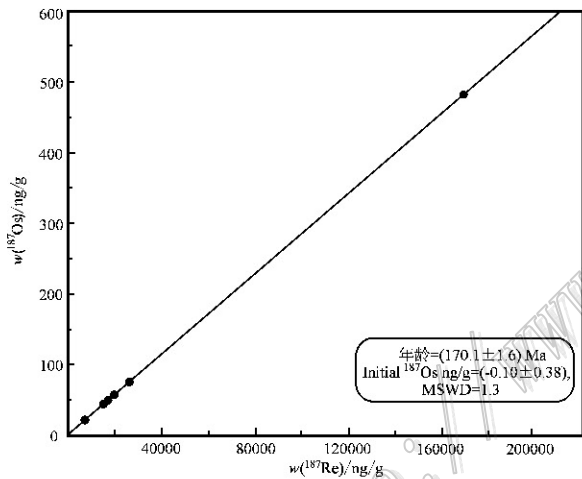


图 7 唐杖子金（钼）矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线
Fig. 7 Re-Os isochron age of molybdenite from the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit

基性岩石中(Stein et al., 2001),有学者据此认为矿床中辉钼矿的 Re 含量可做为指示金属矿床成矿物质来源的示踪剂(Walker et al., 1989; 1994; Foster et al., 1996; 吴福元等, 1999; Lambert et al., 1999; Mao et al., 1999)。Mao 等(1999)综合分析对比了中国各种类型钼矿床中辉钼矿的 $w(\text{Re})$, 发现从地幔来源到壳幔混源再到地壳来源, 矿石中 $w(\text{Re})$ 呈数量级下降, 与幔源、I 型到 S 型花岗岩有关的矿床中, $w(\text{Re})$ 也从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 变化。唐杖子金（钼）矿床中 5 个辉钼矿样品中的 $w(\text{Re})$ 介于 $12.56 \times 10^{-6} \sim 41.67 \times 10^{-6}$, 只有样品 B6770 中辉钼矿的 $w(\text{Re})$ 为 269.50×10^{-6} , 暗示

成矿物质为壳幔混合来源。硫、铅同位素组成亦示踪成矿物质来源于壳幔混合。矿体中 18 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 3.49‰, 4 件闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 2.82‰, 3 件方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 1.66‰(赵成合等, 2009), 共生硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有黄铁矿 > 闪锌矿 > 方铅矿的演化趋势, 表明硫同位素反应达到平衡状态, 硫质具有幔源硫的特征。王宝德等(2002)对冀东地区金矿铅同位素研究表明, 与成矿关系密切的花岗岩中的铅同位素 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.882 \sim 17.465$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.147 \sim 15.510$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 35.722 \sim 37.454$) 与矿石铅吻合 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 14.986 \sim 16.304$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 14.961 \sim 15.408$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 34.834 \sim 36.787$), 两者的铅具有相同来源, 表明冀东地区成矿物质来源具壳幔混源特征。

5.3 矿床形成过程

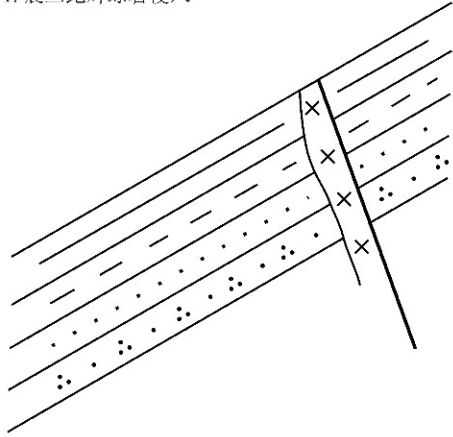
唐杖子金（钼）矿床是由中侏罗世花岗斑岩及其侵入所形成的隐爆角砾岩筒和断裂控制的隐爆角砾岩型钼金矿-脉状金矿床。震旦纪 (721 ± 5) Ma 辉绿岩沿 NEE 向 F₁ 主干断裂上升侵位, 到中侏罗世 (173 Ma) 具壳幔混源特征的花岗质岩浆再次沿 F₁ 主干断裂带浅成或超浅成侵入, 致使围岩发生接触变质作用, 常州沟组上段巨厚层状石英细砂岩形成致密块状的石英岩; 石英岩对气体(流体)起到阻挡作用, 当气体聚集到一定程度, 岩浆爆破应力大于顶部岩层静岩压力时发生隐爆作用(沈保丰等, 2002), 形成隐爆角砾岩筒及外围的环形断裂系统。花岗质岩浆活动为成矿物质活化和迁移提供了热源和动力, 隐爆角砾岩筒和断裂构造系统是含矿热液的运移通道和储存空间。富含挥发分及成矿元素的热液流体, 沿着岩体内部裂隙及断裂系统迁移, 随物理化学条件的变化, 在隐爆角砾岩筒中心角砾岩带形成隐爆角砾岩型钼矿和金矿, 在 NEE 向断裂带及环形断裂带中形成了石英脉型金(银)矿和蚀变岩型金矿床(图 8)。

6 结 论

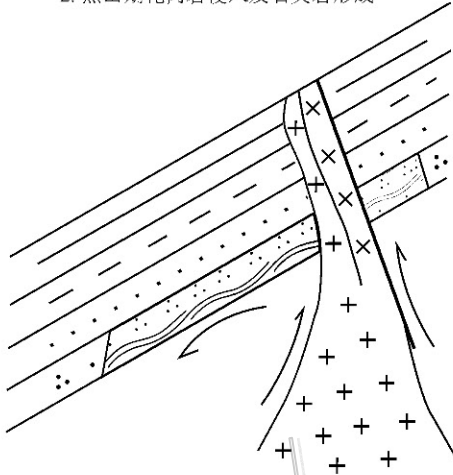
(1) 唐杖子金（钼）矿床主要受控于花岗斑岩及潜火山机构, 金钼成矿作用为同一地质事件的产物, 该矿床属隐爆角砾岩型钼金矿-脉状金矿床。

(2) 本次定年数据表明, 唐杖子金（钼）矿床成矿作用与岩浆活动均发生于中侏罗世, 为早-中侏罗世燕辽地区大规模岩浆侵入活动和钼金多金属成矿事

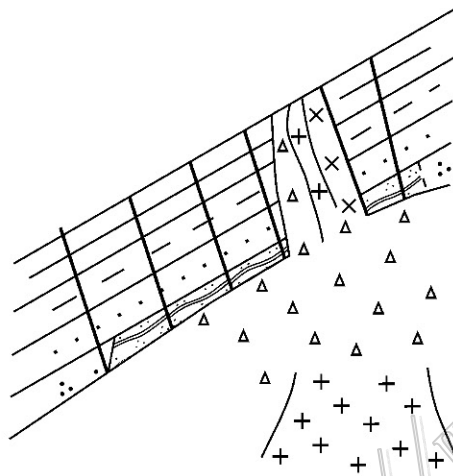
1. 震旦纪辉绿岩侵入



2. 燕山期花岗岩侵入及石英岩形成



3. 顶部气体隐爆形成隐爆角砾岩及断裂系统



4. 含矿热液灌入, 矿体形成

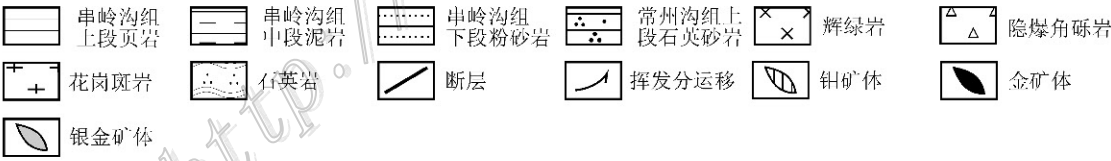
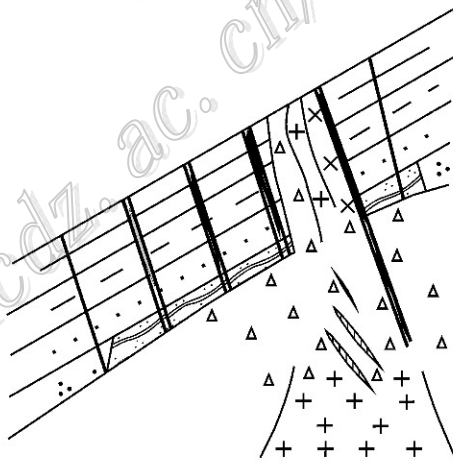


图 8 唐杖子金(钼)矿床成矿模式图

Fig. 8 Metallogenic model for the Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit

件的组成部分。

(3)唐杖子金(钼)矿床中的 S、Pb 同位素以及辉钼矿中 Re 含量特征表明,成矿物质为壳幔混合来源。

志 谢 野外工作得到矿产资源研究所王义天研究员和陈绍聪硕士的帮助,室内工作得到国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室杜安道研究员的指导,在此一并致以诚挚的感谢。

参考文献/References

陈昌勇. 1998. 华北地块北缘金、多金属成矿地质背景[J]. 辽宁地质, (4): 241-250.

崔盛芹, 李锦蓉, 孙家树, 王建平, 吴珍汉, 朱大岗. 2000. 华北陆块北缘构造运动序列及区域构造格局[M]. 北京: 地质出版社.

邓晋福, 莫宜学, 赵海玲, 罗照华, 赵国春, 戴圣潜. 1999. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 18(4):

- 309-315.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,邹晓秋,孙亚利,孙德忠,陈少珍,屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 68(4): 339-347.
- 杜安道,赵敏敏,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-钨同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.
- 郭少丰,汤中立,罗照华,赵文浩. 2009. 冀东唐杖子、牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 28(10): 1458-1464.
- 贺文,叶会寿,张兴康,陈绍聪,王赛,路东宇. 2013. 冀东唐杖子金矿辉绿岩地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质论评, 59(S1): 141-142.
- 贾三石,王恩德,付建飞,宋建潮,席晓风. 2011. 冀东-辽西主要金矿矿集区地质特征的差异性与成矿作用的统一性探析[J]. 地质学报, 85(9): 1493-15062.
- 李俊建,沈保丰,翟安民,曹秀兰. 2002. 冀东地区金矿床类型及其地质特征[J]. 前寒武纪研究进展, 5(2): 73-79.
- 李俊建,沈保丰,翟安民,黄学光,曹秀兰,肖成东. 2004. 冀东地区金矿地质[M]. 北京:地质出版社. 1-133.
- 李颖,刘连登. 1999. 河北峪耳崖和牛心山金矿的对比研究及意义[J]. 黄金地质, 5(2): 9-13.
- 林尔为,郭裕嘉. 1985. 冀东金矿集中区铅同位素研究[J]. 长春地质学院学报, 15(4): 1-10.
- 陆继龙,石厚礼,赵玉岩,郝立波,魏俏巧,赵新运. 2012. 冀东罗文峪花岗岩体 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(3): 179-188.
- 罗镇宽,关康,裘有守,苗来成. 2001. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 地质找矿论丛, 16(4): 226-231.
- 毛景文,Stein H,杜安道,周涛发,梅燕雄,李永峰,藏文栓,李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1): 121-131.
- 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其次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(01): 169-188.
- 裴荣富,吕凤翔,范继璋,方如恒,齐朝顺. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查[M]. 北京:地质出版社. 1-237.
- 秦大军,蔡新平,王杰,高浩中,张宝林,周少平. 1997. 冀东金厂峪特大型金矿床的地质地球化学特征和矿床成因[J]. 地质与勘探, 33(5): 4-9.
- 曲以秀. 1993. 冀东牛心山金矿区岩浆岩特征及其成因探讨[J]. 长春地质学院学报, 23(3): 268-272.
- 芮宗瑶,黄崇轲,齐国明,徐珏,张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京:地质出版社. 1-350.
- 沈保丰,李俊建,翟安民,曹秀兰. 2002. 冀东冀西与岩浆隐爆作用有关的绿岩带再生型金矿床特征[J]. 前寒武纪研究进展, 25(1): 1-10.
- 宋扬,王瑞江,胡建中,王小龙,孙艳,辛洪波,武晗. 2012. 冀东华尖金矿床流体包裹体特征与成矿作用研究[J]. 矿床地质, 31(6): 1289-1300.
- 孙爱群,牛树银,李红阳. 2002. 冀东“长城式”金矿的成因探讨[J]. 地球学报, 23(5): 435-441.
- 王宝德,牛树银,孙爱群,李红阳. 2002. 河北省内生金矿找矿思路的再认识[J]. 地质与勘探, 39(1): 27-31.
- 翁文灏. 1929. 中国东部中生代造山运动[J]. 地质通报, 8(1): 33-44.
- 吴福元,孙德有. 1999. Re-Os 同位素体系理论及其应用[J]. 地质科技情报, 18(3): 43-46.
- 吴珍汉. 1991. 燕山地区金、银成矿期与成矿演化[J]. 地质科技情报, 10(3): 49-55.
- 吴珍汉,张景学. 1998. 冀东宽城-青龙-金厂峪金矿集中区早燕山期构造应力场及其对金矿化的控制作用[J]. 地质力学学报, 4(1): 51-57.
- 许毓奇. 1990. 河北牛心山金矿床地质特征及其与花岗岩的关系[J]. 冶金地质动态, (3): 10-16.
- 叶会寿,王义天,元峰,何春芬,李正远,曹晶,贺文,张兴康. 2013. 河北省宽城县唐杖子金矿补充勘查报告[R].
- 尹利君,刘继顺,刘卫明,罗依珍,崔莎莎,刘文恒. 2013. 冀东唐杖子金矿:一个典型的隐爆角砾岩型金矿[J]. 地质与勘探, 49(6): 1098-1107.
- 余昌涛. 1989. 冀东主要类型金矿床的成因及形成机理研究[A]. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集[C]. 主编:沈阳地质矿产研究所. 北京:地质出版社. 1-48.
- 张秋生,杨振升,高德玉,任洪茂. 1991. 冀东金厂峪地区高级变质区地质与金矿床[M]. 北京:地质出版社. 1-445.
- 张艳春,吴继承. 2003. 冀东“长城式”金矿地质特征及成因[J]. 地质与勘探, 39(4): 31-34.
- 赵成合,李玉振,贾春燕. 2009. 隐爆角砾岩筒型金矿床-河北省宽城县唐杖子金矿地质特征[J]. 河北地质, (4): 8-11.
- 赵海玲,邓晋福,徐立权,李凯明,狄永军,杨秋利. 2001. 冀东地区中生代花岗岩、深部过程与金矿[J]. 桂林工学院学报, 21(1): 20-26.
- 赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动机构造演化[J]. 地质论评, 36(1): 1-13.
- 赵越,徐刚,张拴宏,杨振宇,张岳桥,胡建民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 11(3): 319-328.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Markey R, Stein H, Mor-

- gan J and Malinovskiy D. 2004. Preparation and Certification of Re-Os Dating Reference Materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28(1): 41-52.
- Foster J G, Lambert D D, Frick L R and Maas R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites[J]. *Nature*, 382(6593): 703-706.
- Lambert D D, Foster J G and Frick L R. 1999. Re-Os isotopic systematics of the Voisey's bay Ni-Cu-Co magmatic ore system Labrador [J]. *Canada Lithos*, 47: 69-88.
- 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(11-12): 1815-1818.
- Markey R, Stein H and Morgan J. 1998. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS[J]. *Talanta*, 935-946.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank Rhenium-Osmium Analysis Analytical[J]. *Analytical Chemistry*, 67(13): 2136-2141.
- Smoliar M L, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group I A, II A, IV A and IV B iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099-1102.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du A D and Sub Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shanxi Province, China[J]. *Econ. Geol.*, 92: 827-835.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, Morgan J W and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittilakivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting[J]. *Mineralium Deposita*, 33(4): 329-345.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13: 479-486.
- Walker R J, Carlson R W, Shirey S B and Boyd F R. 1989. Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(7): 1583-1595.
- Walker R J, Morgan J W and Horan M F. 1994. Re-Os isotopic evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusions, Siberia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 4179-4197.