

河北金厂峪金矿床辉钼矿与金矿化关系研究及意义

孙 豪¹⁾, 宋 扬^{1)*}, 李 超²⁾, 郑 明¹⁾, 孙鹏程²⁾, 方 颖³⁾

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

摘要: 辉钼矿 Re-Os 测年方法现已广泛应用于各类金属硫化物矿床成矿年代学研究领域, 已成为石英脉型金矿床实现直接、准确定年的重要手段。然而, 正确理解辉钼矿与金成矿作用之间的密切关系, 选取具有代表性的辉钼矿样品是测年的前提。本文聚焦冀东地区规模最大的金矿床——金厂峪金矿床, 对其石英-钠长石-多金属硫化物脉中的黄铁矿和辉钼矿两者的产出状态及原位微量元素特征进行了详尽的对比, 研究探讨了金厂峪金矿床中辉钼矿与金矿化之间的关系。研究发现石英-钠长石-多金属硫化物脉含金丰富, 可见金和不可见金均大量赋存, 黄铁矿和辉钼矿均为重要的载金硫化物。镜下矿相学及原位微量元素证据表明, 早期形成的含金黄铁矿经历了再活化过程, 为稍晚形成的富金辉钼矿提供了大量的 Au 源, 两者可能为同一大金成矿事件下不同成矿流体脉冲事件的产物。辉钼矿形成于金厂峪金矿的主成矿阶段, 与 Au 的二次浓集紧密相关, 并可作为高品位金矿体的标志性矿物之一。本文认为在准确厘定辉钼矿与金矿化关系的基础上, 辉钼矿 Re-Os 方法是一种可靠的石英脉型金矿直接定年手段。

关键词: 辉钼矿; 原位微量元素; Re-Os 定年; 石英脉型金矿; 金厂峪; 冀东

中图分类号: P618.51; P618.65 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.090601

Relationship between Molybdenite and Gold Mineralization in Jinchangyu Gold Deposit, Hebei Province and Its Significance

SUN Hao¹⁾, SONG Yang^{1)*}, LI Chao²⁾, ZHENG Ming¹⁾, SUN Peng-cheng²⁾, FANG Ying³⁾

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

Abstract: Re-Os dating of molybdenite is a direct and accurate means to date quartz vein-type gold deposits using the model age or isochron approach. However, to correctly identify the exact relationship between molybdenite and gold mineralization, representative molybdenite samples should be selected for dating. In this study, we focused on the largest gold deposit in eastern Hebei Province—Jinchangyu gold deposit—and compared the microscopic structure and in-situ trace element characteristics of molybdenite and auriferous pyrite from quartz-albite-polymetallic sulfide vein. Quartz-albite-polymetallic sulfide veins were found to contain significant amounts of visible gold and invisible gold; both pyrite and molybdenite are known as important gold-bearing sulfides. Based on detailed mineralogical work, we suggest that the early gold-bearing pyrite experienced a remobilization process, which acts as an important source of Au for gold-rich molybdenite. Further, the two may be products of different ore-forming fluid pulse periods under the same large-scale gold mineralization event. Molybdenite was formed in the main metallogenetic stage of the Jinchangyu gold deposit, which is closely

本文由国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC0604106)和自然资源部杰出青年人才项目(编号: KY-BR-XZ-202006)联合资助。

收稿日期: 2021-05-12; 改回日期: 2021-07-06; 网络首发日期: 2021-09-07。责任编辑: 同立娟。

第一作者简介: 孙豪, 男, 1995 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: haosun182@163.com。

*通讯作者: 宋扬, 男, 1983 年生。研究员。主要从事资源勘查学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: songyang100@126.com。

related to the secondary concentration of Au and may be used as one of the symbolic minerals to identify high-grade gold ore bodies. Based on the accurate determination of the relationship between molybdenite and gold mineralization, the molybdenite Re-Os chronometer is a reliable direct dating method for identifying quartz vein-type gold deposits.

Key words: molybdenite; In-situ trace element; Re-Os isotopic dating; quartz vein-type gold deposit; Jinchangyu; Jidong

石英脉型金矿床成矿时代的精确厘定一直是矿床学研究的热点,早期金矿床时代的定年主要通过蚀变矿物如绢云母、白云母、钾长石K-Ar、Ar-Ar、Rb-Sr方法间接地获取金成矿时代(例如,骆万成和伍勤生,1987;富云莲和叶伯丹,1991;吕古贤和孔庆存,1993;Xu et al., 2002; Hart et al., 2002;李厚民等,2003)。近年来一些学者尝试通过含金石英脉中流体包裹体Rb-Sr法、Ar-Ar法或热液锆石U-Pb法更直接的测定金成矿流体的年龄(例如,李献华等,1992;李俊建等,1996;薛良伟等,1999;Hu et al., 2004;毛光周等,2008;于介江等,2010;Bao et al., 2014)。随着Re-Os同位素测年技术的发展,一些金矿化伴生的硫化物如黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿等矿物的Re-Os测年取得了重要进展,其中,辉钼矿(MoS₂)是众多矿物中唯一一种母体同位素(Re)直接替代矿物结构中主要元素(Mo)的硫化物,可以直接测定硫化物的形成年龄(Stein et al., 2001),是开展高精度成矿时代研究的重要选择(Li et al., 2017)。但不可否认的是,并非所有的石英脉型金矿都产出辉钼矿,此外该类金矿床中辉钼矿与金成矿作用的关系也有待进一步研究。

冀东地区位于华北克拉通北缘,区内现已发现有金厂峪、峪耳崖、牛心山、下营坊等金矿床(点)197处(张连昌等,2018),是我国北方重要的石英脉型金矿产区(裴荣富和梅燕雄,2003),这些金矿床中常发育辉钼矿,例如金厂峪金矿床中局部钼矿化的品位高达0.071%,达到有用伴生元素要求(罗镇宽等,2001),甚至在一些金矿的附近形成了独立的钼矿床,如茅山金矿附近的太平村、南双硐钼矿床(孙金龙等,2016),这些特征为运用辉钼矿Re-Os测定金矿成矿时代提供了重要条件,已经获得了金厂峪(Song et al., 2016)、峪耳崖(陈绍聪等,2014)、唐杖子金矿(李正远等,2014)、下营坊金矿(邹滔等,2016)等金矿的成矿时代。然而,由于区内辉钼矿与金成矿作用之间的密切关系尚不清楚,且部分金矿床中辉钼矿的定年结果与其他如K-Ar、Ar-Ar、U-Pb及裂变径迹等方法所获得的金矿年龄存在较大差异(徐昌涛和贾斌,1989;Lin et al., 1995;袁万明等,2001;罗镇宽等,2001;李俊建等,2002;Wang et al., 2020),因此这些矿床中的辉钼矿能否用来直接厘

定区内相关金矿的成矿时代仍有待进一步研究。

本文选择这一地区规模最大的金厂峪金矿床为研究对象,通过对金矿中含金黄铁矿和辉钼矿的产出状态与矿物原位微量元素特征进行详尽对比,研究探讨金厂峪金矿床中辉钼矿与金矿化之间的关系,以期为今后进一步运用辉钼矿Re-Os方法精确解析石英脉型金矿的成矿时代提供一定的矿物学及地球化学证据。

1 区域地质背景

冀东地区地处华北克拉通北缘燕山台褶皱带马兰峪复式背斜的主体展布区域,大地构造位置上位于古亚洲洋构造成矿域和古太平洋构造成矿域的交叠部位,成矿作用丰富,构造岩浆活动强烈而复杂,产出有众多的金(钼)矿床(裴荣富和梅燕雄,2003)。冀东地区地层产出较齐全,根据沉积时代,可依次划分为下前寒武系、上前寒武系及显生界三大组成部分(孙大中,1984),其中,大面积分布的早前寒武纪地层经历多期区域变质、构造变形等系列复杂的演化过程,形成了区内分布广泛的变质褶皱基底。该太古宙变质褶皱基底主要由迁西岩群和遵化岩群两部分组成,岩性主要为一套角闪岩相-麻粒岩相岩石组合(图1)。

区内构造形式多样,区域性的褶皱、断裂、韧性剪切构造三者复合交叠,形成了冀东地区复杂的构造特点。其中,近东西向和北东向展布的断裂构造构成了区内基本的菱形构造格架,控制着区域内盆地构造的形成及岩浆岩的分布(张连昌等,2018),而有韧性剪切带的复合叠加部位往往是金矿的有利成矿堆积空间(裴荣富和梅燕雄,2003)。

区内岩浆活动频繁而强烈,花岗岩侵入岩出露广泛,空间上可大致划分为北部、中部以及南部三个侵入岩带,其中,中部侵入岩带与区内金(钼)成矿关系最为密切,由都山、肖营子等复式岩基和四干顶、茅山、高家店、青山口、牛形山等岩株组成,岩石类型以酸性-中酸性-中基性岩类为主,局部出现偏碱性岩类。据同位素年代学数据统计,冀东地区花岗岩浆活动主要存在迁西期、四堡期、印支期和燕山期四个主要活动期,分别归属于新太古代—中元古代和中生代两个年龄峰期,其中尤以中生代

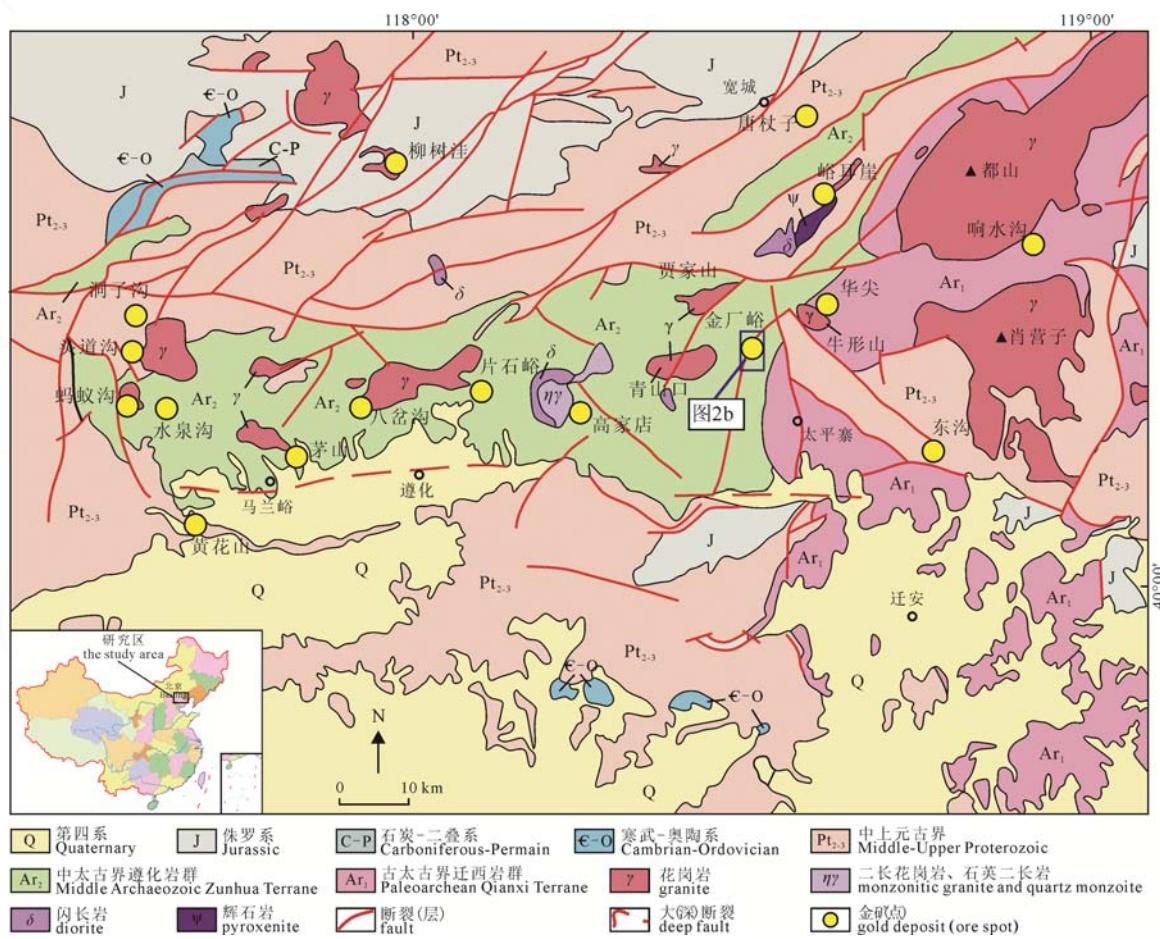


图 1 冀东地区区域地质及主要金矿床分布图(据梅燕雄, 1997; 宋扬等, 2013 修改)
Fig. 1 Geological map of Jidong (east Hebei) area (after MEI, 1997; SONG et al., 2013)

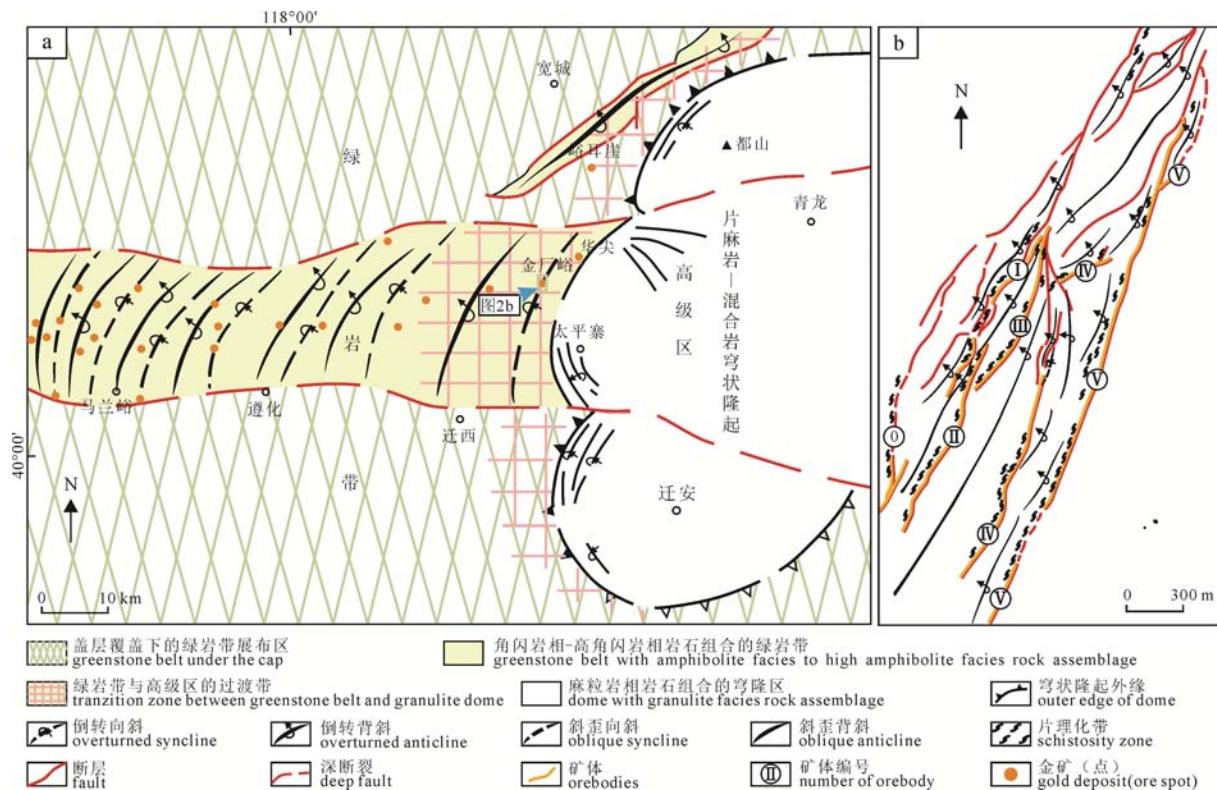


图 2 冀东金成矿带基底构造纲要图(a)(据宋扬等, 2011)和金厂峪金矿区地质简图(b)(据 Song et al., 2016)
Fig. 2 Schematic of the basement structural framework in Jidong gold metallogenic belt (a) (after SONG et al., 2011) and a simplified geological map of the ore field in the Jinchangyu gold deposit (b) (after Song et al., 2016)

岩浆活动最为活跃,与区内金(钼)矿床联系最为紧密(裴荣富和梅燕雄,2003)。

2 矿床地质特征

2.1 赋矿围岩及构造

金厂峪金矿位于冀东金成矿带东部,金厂峪—遵化—马兰峪紧密褶皱绿岩带和都山—太平寨—迁安片麻岩穹状隆起的过渡部位(宋扬等,2011)(图2a)。金厂峪金矿赋存于遵化岩群中,该岩群主要由一套角闪岩相-高角闪岩相变质岩系组成,岩性主要包括斜长角闪岩、角闪岩、角闪斜长片麻岩以及少量磁铁石英岩、辉石麻粒岩、变粒岩等,其中,斜长角闪岩为金厂峪金矿的主要赋矿围岩。金厂峪金矿矿区尺度上未见大规模岩浆侵入体出露,仅发育一些煌斑岩、石英钠长岩和花岗斑岩等基性-中酸性岩脉。矿区西侧及西北侧发育有青山口、贾家山两个较大的花岗岩体(图1),其与金厂峪金成矿之间具有一定的成因联系(梅燕雄,1997;罗镇宽等,2001)。金厂峪金矿产于北北东向展布的金厂峪韧性剪切带中,该剪切带由早期北北东向韧性剪切带和叠加其上的同向韧-脆性剪切带以及更晚形成的构造片理带复合而成,含金矿脉(体)多沿片理化带贯入,并受共轭剪切扩容带控制(梅燕雄,1997)。

2.2 矿体及矿化特征

金厂峪金矿整个矿区北北东向展布,长约6 km,宽约1 km,呈南西开阔北东收敛的狭长楔状(图2b),16个工业矿体自西向东分别划归到0、I、II、III、IV、V 6条金矿脉带,其中,II、III、V号矿脉带含矿性较好。II号矿脉带位于矿区中南部,走向近南北或北东,长约890 m,宽约1~40 m,由地表向下延伸超过400 m,是金厂峪矿床主要的产金矿脉带之一。III号矿脉带位于II号矿带东面,走向北东,倾向南东,沿走向延伸约1 km,宽约20 m,地表向下延深较大,且在深部与II号矿脉带复合,二者合计金资源储量约占整个矿床的65%,矿脉平均品位高达6.99 g/t。V号矿脉带位于矿区东部,受褶皱陡倾的层间剪切破碎带控制,走向北东,倾向北西,倾角70°~85°,近直立。矿脉带长约1500 m,宽约45 m,向下延深约1000 m,为矿区展布规模最大的矿脉带,其平均含金品位为5.93 g/t。

根据容矿岩石类型,可将金厂峪金矿床金矿石类型划分为主要的含金石英-钠长石脉型、含金石英脉型和含金蚀变岩型三种类型,其中以前两者最为重要。矿石多具隐晶质结构、半自形-他形粒状结构,块状、脉状或片状、斑杂状构造。矿石组成较简单,

黄铁矿为主要的金属矿物,其次有磁铁矿、赤铁矿、金红石、辉钼矿、自然金等;非金属矿物主要包括石英、玉髓、钠长石、绢云母、绿泥石以及少量碳酸盐类矿物。

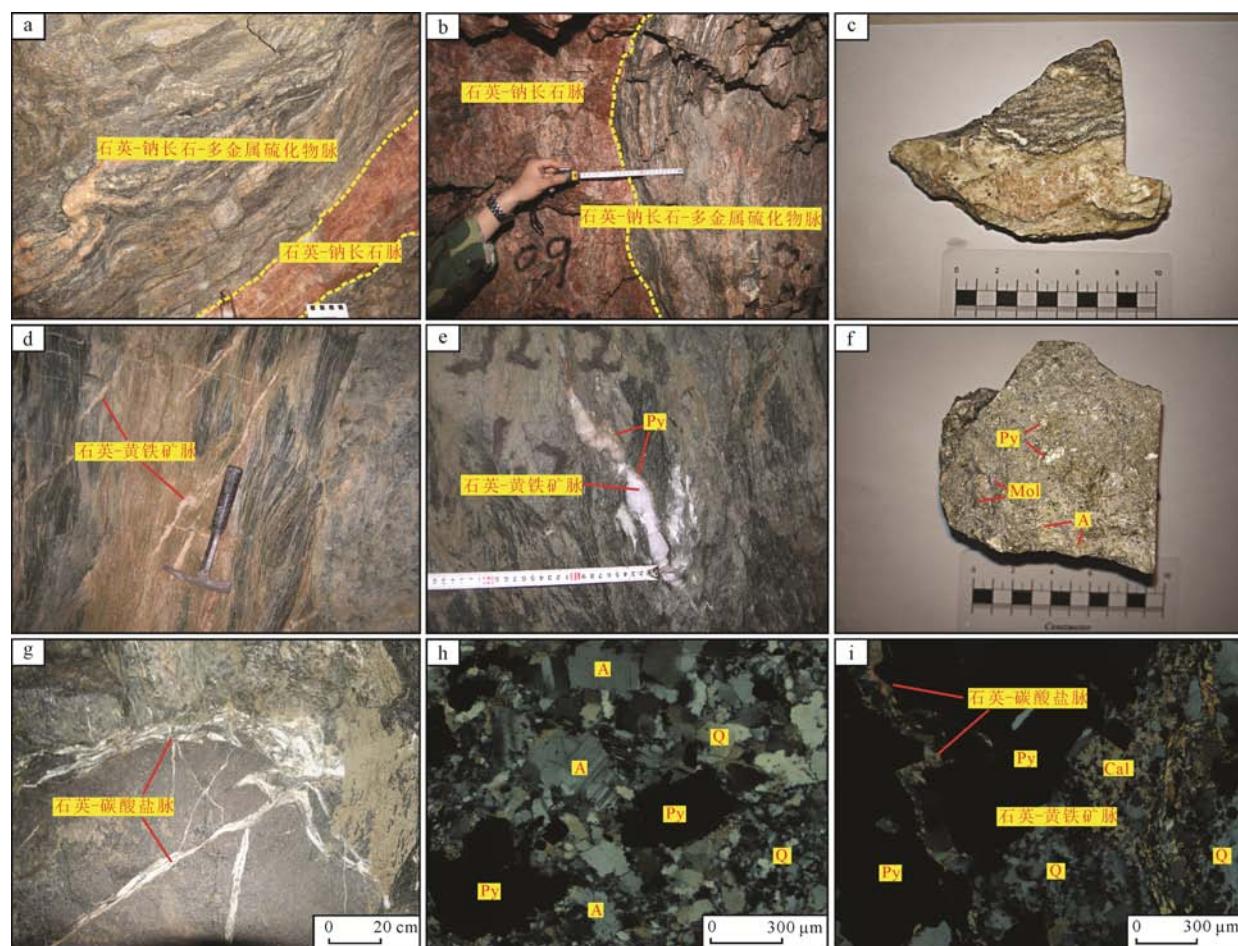
金厂峪金矿围岩蚀变总体较弱,具有明显的水平分带特征,由含金矿脉由近及远依次发育钠长石化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化。钠长石化和硅化常相伴产出,黄铁矿化叠加在近矿蚀变带之上随矿化强度的减弱而逐渐消失。绢云母化和绿泥石化发育在矿脉与贫矿围岩的过渡带,而碳酸盐化则主要分布于无矿化的围岩中。

2.3 成矿期次划分

金厂峪金矿的形成具有多期多阶段的特点。根据脉体内矿物共生组合,并结合各脉体产状、脉体间的穿插关系,将脉体划分为成矿早期的石英-钠长石脉、主成矿期的石英-钠长石-多金属硫化物脉、成矿晚期的石英-黄铁矿脉以及成矿末期的石英-碳酸盐脉(图3)。

2.4 矿石样品特征

本次研究的2件样品(JC-19、JC-22)全部取自金厂峪金矿床V号矿体石英-钠长石-多金属硫化物脉。对两件样品进行了详尽的手标本和镜下观察,矿石中金属矿物主要见有黄铁矿、金红石、辉钼矿、铅铋硫化物、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿等。黄铁矿呈细脉状或浸染状分布于矿石中,以细粒-中粒(100~2000 μm)的半自形-自形晶为主,他形晶相对较少,普遍发育微裂隙暗示着黄铁矿受到较强烈的碎裂作用(图4),光学显微镜及扫描电镜下均未见有明显的环带结构(图4),表明样品中的黄铁矿的流体沉淀环境较为稳定;辉钼矿呈浸染状分布,多以微细叶片状(<50 μm)与他形粒状金红石紧密伴生(图4a-f),辉钼矿与金红石无明显的穿插关系,局部见共结边(图4a),推测两者应为同期流体事件的产物;局部可见微细叶片状辉钼矿和他形粒状金红石交代黄铁矿,形成浸蚀结构、港湾状结构、骸晶结构(图4a-e),暗示着辉钼矿和金红石应晚于黄铁矿形成。镜下,可见自然金以包体金、裂隙金、粒间金的形式包裹于黄铁矿晶体内部或充填在黄铁矿的微裂隙中或黄铁矿颗粒及脉石矿物之间(图4g-l),黄铁矿内的包体金表明黄铁矿与金成矿密切相关,原生包体金与黄铁矿为同期同源产物,而裂隙金的存在则暗示着,金厂峪金矿化并非单一事件的产物,局部可能存在晚于含金黄铁矿的另一期流体事件的发生。非金属矿物以石英、钠长石、绢云母、绿泥石为主,局部可见碳酸盐矿物穿插交代早期的石英、黄铁矿(图3i)。



a, b, c—石英-钠长石-多金属硫化物脉沿片理截切红色石英-钠长石脉; d, e—石英-黄铁矿脉穿插石英-钠长石-多金属硫化物脉; f—石英-钠长石-多金属硫化物脉中的辉钼矿、钠长石、黄铁矿; g—石英-碳酸盐脉; h—石英-钠长石脉中的钠长石、石英、黄铁矿; i—石英-碳酸盐脉穿插石英-黄铁矿脉; A—钠长石; Q—石英; Cal—方解石; Py—黄铁矿; Mol—辉钼矿。

a, b, c—red quartz-albite vein cut by quartz-albite-polymetallic sulfide vein; d, e—quartz-albite-polymetallic sulfide vein cut by quartz-pyrite vein; f—molybdenite, albite and pyrite in quartz-albite-polymetallic sulfide vein; g—quartz-carbonate vein; h—albite, quartz, and pyrite in the quartz-albite vein; i—quartz-pyrite vein cut by quartz-carbonate vein; A—Albite; Q—Quartz; Cal—Calcite; Py—Pyrite; Mol—Molybdenite.

图 3 金厂峪金矿床不同阶段脉体野外、手标本及显微镜下照片

Fig. 3 Images of different stages of host rocks and ores from the Jinchangyu gold deposit

3 样品及测试分析

样品经手标本仔细观察后, 选择代表性部位, 进行切割、精磨抛光制成矿石薄片, 然后在光学显微镜及扫描电镜下对样品薄片中的矿物产出状态及接触关系等矿相学特征进行细致的观察和分析, 理清黄铁矿和辉钼矿的结构特征、形成期次后, 挑选用于分析的矿物颗粒并择取合适的部位圈定分析位置以进行 LA-ICP-MS 原位微量元素分析。

LA-ICP-MS 分析在国家地质实验测试中心完成。样品使用 New Wave UP 213 激光剥蚀系统(美国 New Wave 公司), Thermo Element II 高分辨率电感耦合等离子体质谱仪(德国 Finnigan 公司)进行剥蚀分析。实验过程中采用 He 气运载剥蚀物质, 利用 Mass-1 国际标样对分析数据进行校正。仪器参数为激光束斑直径 40 μm , 激光脉冲 10 Hz, 能量 0.176 mJ。具体实验条件及过程可参考袁继海等(2015)。

4 测试结果

黄铁矿微量元素含量特征如附表 1 所示, 除 Sb 元素含量普遍较低外, 黄铁矿中的 Co、Ni、Ge、Gr、Ti、Mn、Cu、Zn、Pb、Bi、As、Au、Ag、Mo 等亲铁、亲铜元素绝大部分在检测限之上, 而高场强元素除 Zr 外, 其他如 Hf、Nb、Ta、Th、U 等元素大部分低于检测限。分析结果表明, 黄铁矿中的 Ge、Mn 元素含量相对较为均一, 含量分别为 $(0.56\sim 5.12)\times 10^{-6}$ (平均值为 3.34×10^{-6})、 $(0.96\sim 5.55)\times 10^{-6}$ (平均值为 2.77×10^{-6}), 其余所测元素含量变化范围均较大, 其中 Co、Ni 含量分别为 $(24.50\sim 930.10)\times 10^{-6}$ (平均值为 340.41×10^{-6})、 $(32.14\sim 236.90)\times 10^{-6}$ (平均值为 94.98×10^{-6}), 相应的 Co/Ni 比值变化范围为 0.48~7.31, 绝大部分大于 1, 均值为 3.92。主要成矿元素 Cu、Zn、Pb、Bi、Au、Ag 元素含量分别为 $(1.80\sim 138.90)\times 10^{-6}$ (平均值

表 1 金厂峪金矿含金黄铁矿微量元素皮尔森相关系数表
Table 1 Pearson phase relation table for the trace elements of auriferous pyrite collected from Jinchangyu Gold deposit

	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	As	Au	Ag	Ge	Cr	Mn	V	Mo	Ti
Co	1.00														
Ni	0.04	1.00													
Cu	0.14	-0.08	1.00												
Zn	0.12	-0.12	-0.06	1.00											
Pb	-0.10	0.04	0.96	-0.07	1.00										
Bi	-0.05	-0.08	0.97	-0.06	1.00	1.00									
As	0.21	0.28	0.00	-0.12	-0.17	-0.12	1.00								
Au	0.13	0.75	-0.10	0.29	-0.20	-0.20	0.91	1.00							
Ag	-0.04	0.67	0.60	-0.07	0.55	0.73	0.66	1.00							
Ge	-0.07	-0.22	0.35	0.13	0.42	0.43	-0.20	-0.12	0.21	1.00					
Cr	-0.03	-0.19	-0.12	0.98	-0.09	-0.08	-0.18	-0.18	0.25	-0.10	0.19	1.00			
Mn	-0.28	0.04	-0.07	0.72	0.02	0.00	-0.02	0.31	0.12	0.24	0.80	1.00			
V	-0.63	-0.53	-0.30	0.13	-0.28	-0.29	-0.12	0.10	-0.11	0.16	0.24	0.28	1.00		
Mo	0.04	-0.20	-0.14	0.96	-0.11	-0.09	-0.24	0.19	-0.16	0.23	0.98	0.70	0.14	1.00	
Ti	-0.42	-0.38	-0.10	-0.14	-0.13	-0.12	-0.20	-0.17	-0.17	0.29	-0.06	-0.03	0.90	-0.14	1.00

注: 本文以 $|t| \geq 0.5$ 为界线, 相关系数绝对值大于 0.5 的元素之间具有可讨论的相关性(加粗数据), 下文同。

表 2 金厂峪金矿辉钼矿微量元素皮尔森相关系数表
Table 2 Pearson phase relation table for the trace elements of molybdenite collected from Jinchangyu Gold deposit

	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Bi	As	Au	Ag	Ge	Cr	Mn	Sb	V	Fe	W	Ti
Co	1.00																
Ni	0.89	1.00															
Cu	-0.85	-0.82	1.00														
Zn	0.06	0.16	-0.10	1.00													
Pb	-0.76	-0.48	0.75	-0.27	1.00												
Bi	-0.78	-0.50	0.80	-0.12	0.94	1.00											
As	0.88	0.96	-0.79	0.21	-0.51	-0.51	1.00										
Au	-0.78	-0.46	0.68	0.06	0.90	0.90	-0.47	1.00									
Ag	-0.35	-0.11	0.43	-0.35	0.70	0.67	-0.08	0.55	1.00								
Ge	-0.38	-0.53	-0.23	-0.45	0.29	0.20	-0.18	0.31	0.40	1.00							
Cr	-0.18	-0.24	0.09	0.83	-0.30	-0.15	-0.14	0.04	-0.50	-0.32	1.00						
Mn	0.70	0.63	-0.68	0.67	-0.78	-0.72	0.65	-0.59	-0.63	-0.56	0.46	1.00					
Sb	0.23	0.38	-0.46	0.22	-0.20	-0.14	0.52	-0.01	0.07	0.62	0.18	0.26	1.00				
V	-0.54	-0.48	0.25	-0.12	0.27	0.32	-0.36	0.37	0.30	0.77	0.22	-0.48	0.49	1.00			
Fe	0.59	0.25	-0.49	-0.08	-0.74	-0.81	0.19	-0.89	-0.59	-0.46	-0.09	0.50	-0.36	-0.56	1.00		
W	-0.30	-0.27	0.01	-0.29	0.14	0.14	-0.15	0.22	0.37	0.88	-0.04	-0.40	0.65	0.86	-0.44	1.00	
Ti	-0.29	-0.23	-0.04	-0.28	0.16	0.12	-0.12	0.18	0.32	0.82	-0.03	-0.39	0.64	0.90	-0.39	0.91	1.00

为 25.66×10^{-6})、 $(2.87 \sim 158.20) \times 10^{-6}$ (平均值为 23.63×10^{-6})、 $(BDL \sim 14468.00) \times 10^{-6}$ (平均值为 1812.39×10^{-6})(BDL 为低于检测限值, 下文同)、 $(0.01 \sim 1696.00) \times 10^{-6}$ (平均值为 194.57×10^{-6})、 $(BDL \sim 6.36) \times 10^{-6}$ (平均值为 1.36×10^{-6})、 $(BDL \sim 53.72) \times 10^{-6}$ (平均值为 12.58×10^{-6})。此外, 黄铁矿中 Ti 和 Mo 含量均表现为明显的高异常, 含量分别为 $(11.73 \sim 5788.20) \times 10^{-6}$ (平均值为 613.12×10^{-6})、 $(BDL \sim 4718.00) \times 10^{-6}$ (平均值为 632.32×10^{-6})。

辉钼矿微量元素含量特征如附表 2 所示, 由表中分析结果可知, 辉钼矿中除 Ge、Hf、Ta 元素有个别测点含量低于检测限外, 其余所分析的元素含量均高于检测限。其中, Sb 元素在辉钼矿中分布较为稳定, 含量为 $(0.90 \sim 3.20) \times 10^{-6}$ (平均值为 1.95×10^{-6}), 其他元素含量变化较大。除 Co、Ni、Ge 元素的含量与本次所测黄铁矿相当外, 其余对应元素含量普遍较黄铁矿高, 主要成矿元素 Cu、Zn、Pb、Bi、Au、Ag 元素含量依次为 $(82.99 \sim 630.60) \times 10^{-6}$ (平均值为 433.81×10^{-6})、 $(3.45 \sim 2031.00) \times 10^{-6}$ (平均值为 372.08×10^{-6})、 $(2950.00 \sim 403301.00) \times 10^{-6}$ (平均值为 19087.58×10^{-6})、 $(592.50 \sim 3605.00) \times 10^{-6}$ (平均值为 2108.53×10^{-6})、 $(16.71 \sim 169.30) \times 10^{-6}$ (平均值为 96.33×10^{-6})、 $(51.20 \sim 604.00) \times 10^{-6}$ (平均值为 254.03×10^{-6})。此外, As、Ti、V、Fe、W 元素也表现为一定程度的富集, 平均值分别为 74.18×10^{-6} 、 31463.60×10^{-6} 、 193.88×10^{-6} 、 104400.75×10^{-6} 、 68.04×10^{-6} 。高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta)和放射性元素(Th、U)含量在辉钼矿中变化范围较大, 平均值分别为 514.67×10^{-6} 、 10.48×10^{-6} 、 92.20×10^{-6} 、 2.12×10^{-6} 、 6.05×10^{-6} 、 3.82×10^{-6} 。

5 讨论

5.1 金厂峪金矿床中金的赋存状态

金在硫化物中主要以可见金和不可见金的形式赋存, 其中, 可见金根据其与载金硫化物之间的结构关系, 包括包体金、裂隙金以及晶隙金(又称粒间金)(刘英俊和马东升, 1991), 不可见金包括粒径 $<0.1 \mu\text{m}$ 的亚微米-纳米金矿物颗粒(Au^0)和进入到矿物晶格中的固溶体金(Au^+)(Reich et al., 2005; Cook et al., 2009)。

在光学显微镜及扫描电镜下对金厂峪金矿矿石薄片进行了细致的观察, 在黄铁矿中可见有大量的包体金、裂隙金及晶隙金(图 4g-l)存在, 说明金厂峪金矿中可见金较为丰富, 黄铁矿为主要的载金矿物之一。黄铁矿中 Co 和 Ni 常以类质同象的方式替代黄铁矿中的 Fe, As 则常置换 S(Craig et al., 1998;

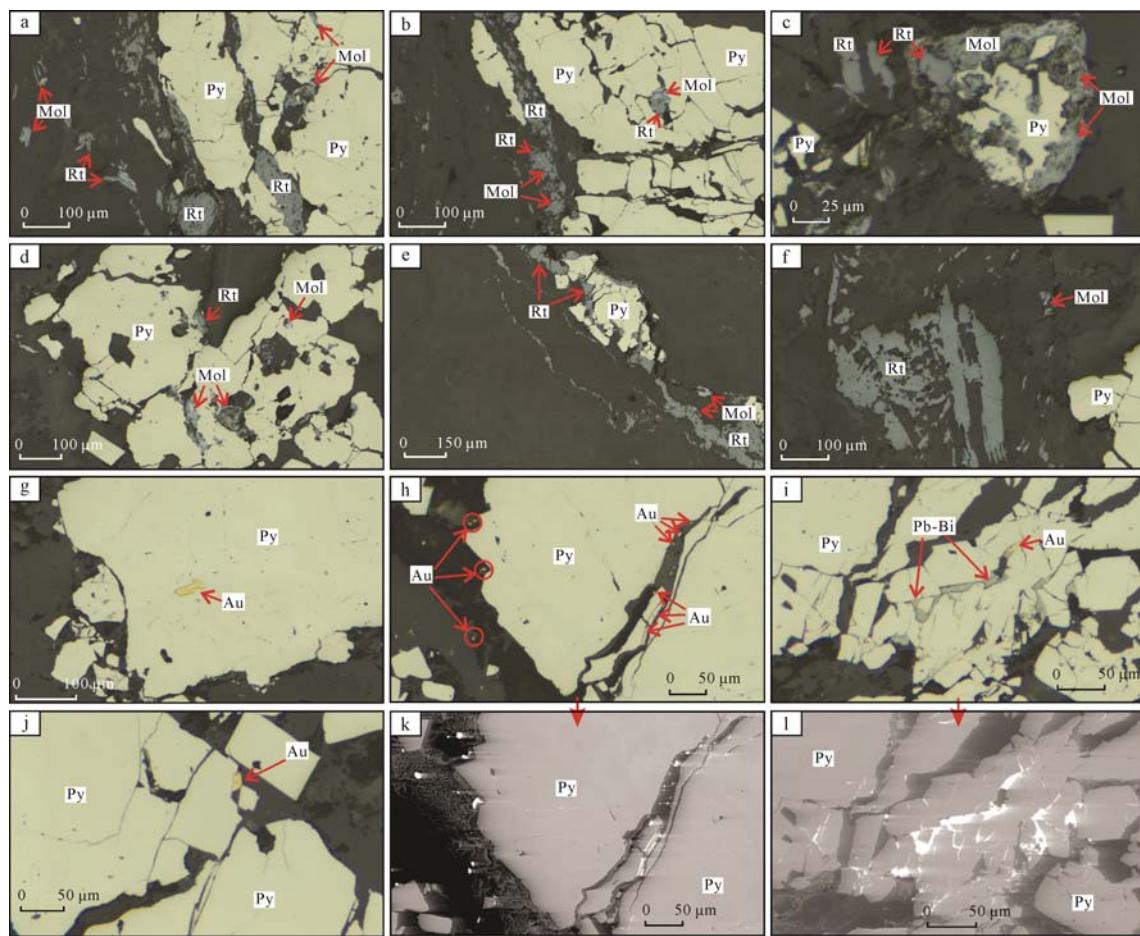
严育通等, 2012), 当 Co^{3+} 、 Ni^{4+} 置换 Fe^{2+} 或 As^+ 置换 S^{2-} 时, 黄铁矿的晶胞参数将发生改变(徐国风和邵洁莲, 1980; 陈光远等, 1988; Simon, 1999), 这种晶格的畸变有助于更多的微量元素能够捕获进入到黄铁矿的晶体结构中, 例如 Au、Ag、Cu、Mo 等成矿元素(Reich et al., 2005; Deditius et al., 2011; Li et al., 2019a), 此时这些微量元素的含量应与 Co、Ni、As 元素含量呈正相关性。本次研究的含金黄铁矿中 Au、Ag 均与 Ni、As 呈高度正相关性(表 1), 暗示着部分 Au、Ag 进入到了黄铁矿晶体结构中, 以不可见的晶格金、晶格银形式存在其中, 同时也表明 Au、Ag、Ni、As 元素在成矿流体中共同迁移富集。

Reich et al.(2005)的研究表明, 富砷黄铁矿中 Au 的溶解量与 As 的对应含量密切相关, 两者间的关系可定义为曲线 $C_{\text{Au}}=0.02 \times C_{\text{As}}+4 \times 10^{-5}$, 曲线之上, Au 以饱和的自然金(Au^0)形式存在, 而在曲线下方, Au 以不饱和的固溶体形式(Au^+)存在, 该研究结果已被众多学者用以判别 Au 在黄铁矿中的赋存状态(例如, Large et al., 2009; Li et al., 2019a, b; 林祖革等, 2019; Baidya et al., 2020)。本次研究结果显示, 金厂峪金矿含金黄铁矿在曲线上方和下方均有较多测点分布, 表明 Au 以不饱和的固溶体金及亚微米-纳米自然金两种状态存在于黄铁矿中(图 5a), 这与上述元素相关性分析结果及镜下观察到的大量自然金包体相吻合。元素相关性分析结果显示(表 1), 黄铁矿中除 Au-Ag 呈明显正相关性($r=0.66$)外, 其他能与 Au 化合的元素(例如 Bi、Cu)均未和 Au 呈现明显的正相关性, 这说明黄铁矿中的金矿物主要存在自然金和银金矿(或金银矿), 其他金矿物包体含量较少。

有关辉钼矿中 Au 赋存状态的研究资料较少, 但辉钼矿中 Cu、Pb、Bi、Ag 均与 Au 呈现明显的正相关性(相关系数分别为 $r=0.68$ 、 $r=0.90$ 、 $r=0.90$ 、 $r=0.55$)(表 2), 表明辉钼矿中可能含有例如铋金矿、银金矿(或金银矿)等金矿物包体, 或 Au 以类质同象、超显微纳米颗粒赋存于辉钼矿的铜铅铋硫化物包体中, 至于 Au 是否以晶格金的形式赋存于辉钼矿中则仍需要进一步的研究。大量可见金及不可见金赋存于黄铁矿及辉钼矿中, 暗示着石英-钠长石-多金属硫化物脉形成于金厂峪金矿的主成矿阶段, 且其中的黄铁矿和辉钼矿均为重要的载金矿物。

5.2 金厂峪金矿床含金黄铁矿与辉钼矿的关系

黄铁矿中的 Co/Ni 值是判别黄铁矿形成环境的重要参数(Bralia et al., 1979; 陈光远等, 1988; 周涛发等, 2010), 一般而言, 沉积型黄铁矿 Co/Ni 值常小于 1, 岩浆热液型黄铁矿 Co/Ni 值常分布在 1~5



a, b, c, d, e, f—辉钼矿和金红石紧密共生，两者蚕食交代含金黄铁矿；g—自然金呈包体产出在黄铁矿内部；h—自然金呈裂隙金、粒间金产出在黄铁矿微裂隙及黄铁矿与脉石矿物粒间；i—铅铋硫化物与自然金紧密共生，两者共同充填在含金黄铁矿的微裂隙中；j—自然金在黄铁矿粒间产出；k, l—h, i 光学显微镜照片对应的扫描电镜 BSE 照片；

Py—黄铁矿；Rt—金红石；Mol—辉钼矿；Au—自然金；Pb-Bi—铅铋硫化物。

a, b, c, d, e, f—molybdenite and rutile coexist closely, and both replace auriferous pyrite; g—gold occurs as Au-inclusion in pyrite; h—gold occurs as fissured gold in microcracks of pyrite, or intergranular gold between pyrite and gangue mineral grains; i—Pb-Bi sulfide closely coexists with native gold, both are found in the microfissures containing auriferous pyrite; j—natural gold is produced between pyrite grains; k, l—h, i—corresponding scanning electron microscope BSE images; Py—pyrite; Rt—rutile; Mol—molybdenite; Au—gold; Pb-Bi—lead-bismuth sulfide.

图 4 金厂峪金矿床石英-钠长石-多金属硫化物脉矿石光学显微镜及扫描电镜下照片

Fig. 4 Optical microscope and scanning electron microscope images of quartz-albite-polymetallic sulfide vein ore from Jinchangyu gold deposit

之间，且变化范围较大(李红兵和曾凡治, 2005)，而变质热液型黄铁矿流体来源主要为建造水和变质水，其 Co/Ni 值常小于 1 或接近 1(严育通等, 2012)。在岩浆演化过程中，由于 Ni²⁺的八面体择位能比 Co²⁺大的多(Ni²⁺: 20.6 cal/mol, Co²⁺: 7.4 cal/mol)，故 Ni²⁺在岩浆结晶的早期就大量进入铁镁造岩矿物中，而 Co²⁺则在残余岩浆或由岩浆冷凝析出的热液中相对富集，加之在黄铁矿形成时 Co²⁺置换 Fe²⁺的能力强于 Ni²⁺，因而岩浆热液黄铁矿中的 Co 含量常高于甚至远高于 Ni，即造成了岩浆热液型黄铁矿 Co/Ni 值常大于 1 甚至远大于 1(童潜明, 1986; 冷成彪, 2017)。金厂峪金矿床中含金黄铁矿的 Co/Ni 值绝大多数大于 1 且变化范围较大，符合岩浆热液黄铁矿特征。

由于 Ni 常替代黄铁矿晶格中 Fe 的位置，并且在还原环境下活动性较弱，因而很难在后期的成岩及热液扰动过程中迁移释放出来(Tribouillard et al., 2006; Large et al., 2009)，故黄铁矿中的 Ni 含量相对较为稳定，可提供一定的形成环境及物质来源信息(Koglin et al., 2010; 赵海香等, 2015)。在岩浆作用过程中，Ni 在地幔或超镁铁-镁铁质岩石中强烈富集(如地幔中平均 Ni 含量为 1960×10^{-6} (McDonough, 2003))，而在地壳或经历高分异的中-酸性岩石中 Ni 的含量则明显降低(如大陆地壳的平均 Ni 含量为 105×10^{-6} (Taylor and McLennan, 1985; Taylor and McLennan, 1995))。金厂峪金矿中含金黄铁矿的 Ni 含量变化范围为 $32.14 \times 10^{-6} \sim 236.90 \times 10^{-6}$ ，平均值为 94.98×10^{-6} ，表明形成含金黄铁矿的热液流体可能

主要来源于地壳或中酸性岩。

辉钼矿中 Re 的含量能提供物质来源信息, 成矿物质由幔源-壳幔混源-壳源方向演化, 辉钼矿中 Re 的含量有递减的趋势(Mao et al., 1999), 一般而言, 成矿物质主要来源于地幔, 辉钼矿中 Re 含量大于 100×10^{-6} ; 成矿物质为壳幔混合源的辉钼矿 Re 含量多在几十 10^{-6} ; 而当成矿物质完全来自壳源时, 辉钼矿 Re 含量则常小于 10×10^{-6} (孟祥金等, 2007; Pašava et al., 2016; 周芳春等, 2020)。金厂峪金矿中辉钼矿的 Re 含量普遍较低, 变化范围为 $(0.3\text{--}9.6) \times 10^{-6}$, 平均值为 3.6×10^{-6} (Song et al., 2016), 表明金厂峪金矿中辉钼矿的形成也与壳源物质高度相关。

上述特征表明, 含金黄铁矿和辉钼矿的物质来源相似, 那么两者是否为同一热液流体的产物? 两者与金矿化之间又有何关系呢? 通过研究发现, 尽管含金黄铁矿和辉钼矿具有相似的流体物质源区特征且共同产出在石英-钠长石-多金属硫化物脉中, 但镜下矿相学特征显示, 金厂峪金矿石英-钠长石-多金属硫化物脉样品中局部见辉钼矿和金红石交代含金黄铁矿, 形成港湾状、浸蚀等交代特征结构或充填在含金黄铁矿的裂隙中(图 4a-e), 可知辉钼矿和金红石应晚于含金黄铁矿形成。而大量的金红石与辉钼矿共生, 两者无穿插交代关系, 局部形成共结边(图 4a), 表明金红石和辉钼矿为同一成矿热液中形成。金红石(TiO_2)是一种成分简单且键性很强的简单氧化物, 矿物结晶能力较强, 因而常在热液的早阶段结晶出来(陈光远等, 1988)。如果金红石、辉钼矿与含金黄铁矿为同一热液流体的不同演化阶段的产物, 那么理论上金红石应早于含金黄铁矿结晶, 这与上述镜下矿相学特征显然不符。由此可知, 金红石、辉钼矿与含金黄铁矿并非同一热液流体的产物。辉钼矿中亲铁亲铜元素(Cu、Pb、Bi 等)及高场强元素(Nb、Ta、Hf 等)平均含量普遍高于含金黄

铁矿约 1~2 个数量级(如附表 1、2; 图 5b), 亦暗示辉钼矿和含金黄铁矿形成于不同的成矿热液。

金厂峪金矿黄铁矿中包体金和裂隙金均有产出(图 4), 表明金厂峪金矿的形成经历了多阶段的金富集沉淀过程(刘英俊和马东升, 1991), 而大量裂隙金与铅铋硫化物一同形成在黄铁矿裂隙中(图 4i, l)及辉钼矿中极高的铅铋金含量(附表 2), 则表明辉钼矿与含金黄铁矿形成之后的金富集过程紧密相关。含金黄铁矿中赋存的 Au 在后期的碎裂、变形重结晶或热液流体的改造过程中可以活化迁移再释放而进一步浓集(Large et al., 2007; Cook et al., 2009; Fougerouse et al., 2016)。因而, 辉钼矿中平均 Au 含量较含金黄铁矿高出近 2 个数量级(图 5b), 其中的 Au 来源可能有两种解释: 1)先存含金黄铁矿再活化来源; 2)新的富 Au 流体来源。本次研究发现, 金厂峪金矿床含金黄铁矿普遍发育微裂隙(图 4), 表明黄铁矿受到了强烈的挤压碎裂作用; 黄铁矿中发育较多的包体金, 且 Au 含量变化较大(BDL~ 6.36×10^{-6}), 而平均 Au 含量较低(均值为 1.36×10^{-6}); 黄铁矿富 Ti、Mo(附表 1), 而辉钼矿高度富 Fe(附表 2), 黄铁矿局部发育明显的溶蚀边结构(图 4c), 说明辉钼矿、金红石热液流体与含金黄铁矿进行了充分的水岩反应; 上述特征均暗示含金黄铁矿中的 Au 可能经历了再活化迁移, 浓集释放过程(Cook et al., 2009; Fougerouse et al., 2016)。尽管形成辉钼矿的成矿热液是否本身富 Au 尚不清楚, 但可以明确的是, 含金黄铁矿的再活化对富金辉钼矿的形成具有重要贡献, 辉钼矿与 Au 的二次富集密切相关。由此推知辉钼矿是金厂峪金矿主成矿阶段的产物, 同时, 也可作为高品位金矿体的标志性矿物之一。

Bai et al.(2019)对金厂峪金矿石英-硫化物脉中的含金黄铁矿进行了 Re-Os 定年, 获得等时线年龄为 (223.5 ± 6.0) Ma, 与 Song et al.(2016)辉钼矿 Re-Os

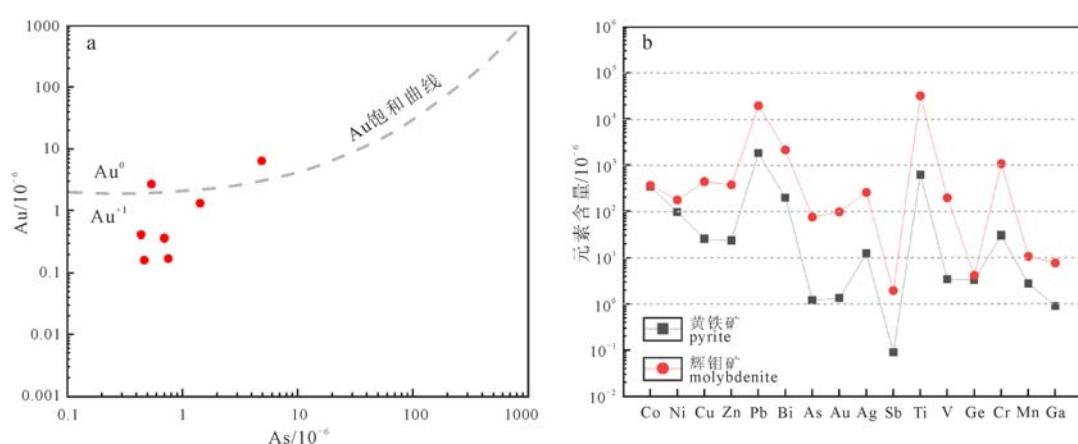


图 5 金厂峪含金黄铁矿 Au/As 比值图(a)和含金黄铁矿与辉钼矿微量元素平均含量特征对比图(b)

Fig. 5 Binary plots of Au vs. As for auriferous pyrite from Jinchangyu gold deposit (a) and the average content of trace elements in a contrast diagram of pyrite and molybdenite from the Jinchangyu deposit (b)

测年结果(等时线年龄为 (223 ± 4) Ma, 加权平均年龄为 (225 ± 4) Ma)在误差范围内基本一致。该结果表明辉钼矿虽晚于含金黄铁矿形成,但两者可能为同一大成矿事件下不同成矿流体脉冲事件的产物,两者的年代学数据均指示金厂峪金矿形成于中生代早期,可能与印支期构造岩浆活动有关。

5.3 辉钼矿 Re-Os 方法测定石英脉型金矿成矿时代的适用性

石英脉型金矿由于围岩蚀变较弱、成矿后热扰动和构造作用叠加破坏等因素的影响,使得难以选用合适的矿物开展常规同位素定年来直接获取金矿的成矿时代,故早期一般利用与矿体有关的地质体相互关系或与金矿伴生的蚀变岩或蚀变矿物的同位素年龄来间接的确定金矿的成矿时代(翟明国等,2001)。

近二十年来,部分学者先后采用石英流体包裹体 Rb-Sr 法、Ar-Ar 法、热液锆石 U-Pb 法、硫化物 Rb-Sr 法对石英脉型金矿床进行了直接定年尝试,尽管取得了一些成功的案例,但由于(1)Rb 的易活动性, Rb-Sr 封闭体系在中高温及变质事件中容易重新开放; (2)Ar 为极为活泼的气体元素,容易发生过剩或丢失; (3)次生包裹体难以剔除; (4)热液锆石与岩浆、变质锆石难以区分; (5)热液锆石成因机制复杂; (6)Rb-Sr 在硫化物中的赋存状态尚不清楚; (7)硫化物中的 Rb-Sr 含量通常很低,常低于质谱仪的检测限; (8)Rb-Sr 等时线的构建,同源且具有差异明显的 Rb/Sr 比值的样品难以获取等系列因素的影响,该类方法在成矿年代学研究中的应用受到制约(刘建明等, 1998; 魏俊浩等, 2003; 毕诗健等, 2008; 陈文等, 2011)。

Re、Os 均为高度亲铁和亲硫元素,趋向于在地核和金属硫化物中富集(杜安道等, 2009),因而 Re-Os 同位素体系是目前金属硫化物矿床成矿年代研究中最直接有效的定年手段。辉钼矿是公认的 Re-Os 同位素定年代表性矿物,当前已在各种金属硫化物矿床成矿年代学研究中获得了广泛的应用(李晶等, 2010; 李超等, 2012),与其他定年体系及定年对象相比,通过辉钼矿 Re-Os 方法测定石英脉型金矿的年龄具有以下几点优势: 1)辉钼矿含有异常高的 Re 含量(可达 10^{-6} 至百分级别(Stein et al., 2001)),且一般情况下基本不含有普通 Os(Markey et al., 1998; Stein et al., 2001; 杜安道等, 2009),故相比黄铁矿、毒砂、黄铜矿等低 Re 硫化物,辉钼矿取样量小,测年精度更高、可以实现年轻矿床的定年且单个样品即可直接获得模式年龄; 2)辉钼矿 Re-Os 体系即使在极端的温度-压力环境下仍能保

持稳定(Raith and Stein, 2000; Stein et al., 2001, 2003; Stein, 2006),故在复杂的地质背景下,其所获得的地质年龄结果可靠性更强; 3)辉钼矿具有极高的 Re/Os 比,通过对单一辉钼矿脉进行多次独立分析,并进行类似锆石 U-Pb 定年的加权平均,可实现分离万年时间尺度的高精度测年(例如 Li et al., 2017),故能够结合更为精细的成矿时间信息对石英脉型金矿的成矿作用过程进行解剖。

然而,金矿的形成往往具有多期性和阶段性(张成喜, 1989),因而厘清辉钼矿与金矿化之间的密切关系,选取与金矿化同时代的辉钼矿样品是开展辉钼矿 Re-Os 定年的前提,而在对野外地质特征进行仔细观察分析的基础之上,对所采取的野外样品进行详尽的矿相学和微量元素特征分析是正确理解辉钼矿和金成矿作用之间关系,获取准确且具有地质意义的辉钼矿 Re-Os 年龄的关键。

6 结论

1)金厂峪金矿石英-钠长石-多金属硫化物脉形成于金厂峪金矿的主成矿阶段,脉中产出的黄铁矿和辉钼矿均为重要的载金矿物。

2)辉钼矿与金厂峪金矿 Au 的二次富集密切相关,是金厂峪金矿主成矿阶段的产物,同时,也可作为金厂峪高品位金矿体的标志性矿物之一。辉钼矿与含金黄铁矿为印支期构造岩浆活动背景中同一成矿事件下不同成矿流体脉冲事件的产物。

3)在正确理解辉钼矿与金成矿作用之间的密切关系,选取具有代表性的辉钼矿样品的前提下,辉钼矿 Re-Os 方法是一种可靠的石英脉型金矿直接定年方法。

致谢: 对几位匿名审稿专家及编辑提出的宝贵意见及建议,在此致以衷心的感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC0604106), and Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China (No. KY-BR-XZ-202006).

本文附有增强材料(附表 1, 2),请通过本文网络版阅读或下载。

参考文献:

- 毕诗健, 李建威, 赵新福. 2008. 热液锆石 U-Pb 定年与石英脉型金矿成矿时代: 评述与展望[J]. 地质科技情报, 27(1): 69-76.

- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1988. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 陈绍聪, 叶会寿, 王义天, 张兴康, 路东宇, 胡华斌. 2014. 冀东峪耳崖金矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 41(5): 1565-1576.
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 张宗清, 戴樟漠, 施泽恩, 孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. 地质学报, 85(11): 1917-1947.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 锌-锇同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 28(3): 288-304.
- 富云莲, 叶伯丹. 1991. 广东清远—高要金矿的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年[J]. 岩石矿物学杂志, 10(1): 21-28.
- 冷成彪. 2017. 滇西北红山铜多金属矿床的成因类型: 黄铁矿和磁黄铁矿 LA-ICPMS 微量元素制约[J]. 地学前缘, 24(6): 162-175.
- 李超, 屈文俊, 杜安道, 周利敏. 2012. 含有普通锇的辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 28(2): 702-708.
- 李红兵, 曾凡治. 2005. 金矿中的黄铁矿标型特征[J]. 地质找矿论丛, 20(3): 199-203.
- 李厚民, 毛景文, 沈远超, 刘铁兵, 张连昌. 2003. 胶西北东季金矿床钾长石和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. 矿床地质, 22(1): 72-77.
- 李晶, 孙亚莉, 何克, 冼伟胜, 仇建军, 张旭. 2010. 辉钼矿 Re-Os 同位素定年方法的改进与应用[J]. 岩石学报, 26(2): 642-648.
- 李俊建, 沈保丰, 骆辉, 翟安民, 曹秀兰. 2002. 华北地台北缘中段金矿床成矿年代学研究[J]. 前寒武纪研究进展, 25(3-4): 233-239.
- 李俊建, 沈保丰, 毛德宝, 李双保, 周慧芳, 程玉明. 1996. 吉林夹皮沟金矿成矿时代的研究[J]. 地质学报, 70(4): 335-341.
- 李献华, 桂训唐, 程景平, 阴国渠. 1992. 广东高凤金矿形成时代的 Rb-Sr、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定[J]. 矿床地质, 11(4): 367-373.
- 李正远, 叶会寿, 贺文, 曹晶, 张兴康, 王赛, 路东宇, 李超. 2014. 冀东唐杖子金(钼)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 33(6): 1366-1378.
- 林祖革, 赵新福, 熊乐, 朱照先. 2019. 胶东三山岛金矿床黄铁矿原位微区微量元素特征及对矿床成因的指示[J]. 地球科学进展, 34(4): 399-413.
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998. 成矿流体活动的同位素定年方法评述[J]. 地球物理学进展, 13(3): 47-56.
- 刘英俊, 马东升. 1991. 金的地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 罗镇宽, 关康, 裴有守, 苗来成, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2001. 冀东金厂峪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.
- 骆万成, 伍勤生. 1987. 应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年龄[J]. 科学通报, 32(16): 1245-1248.
- 吕古贤, 孔庆存著. 1993. 胶东玲珑-焦家式金矿地质[M]. 北京: 科学出版社.
- 毛光周, 华仁民, 龙光明, 陆慧娟. 2008. 江西金山金矿成矿时代探讨——来自石英流体包裹体 Rb-Sr 年龄的证据[J]. 地质学报, 82(4): 532-539.
- 梅燕雄. 1997. 冀东金矿成矿特征及成矿演化[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 刘建光, 屈文俊, 杨竹森, 左力艳, 万禄进, 肖茂章. 2007. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 81(7): 946-951.
- 裴荣富, 梅燕雄. 2003. 金属成矿省演化与成矿年代学—以华北地台北缘及其北侧金属成矿省为例[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋扬, 王瑞江, 胡建中, 谭应佳, 石成龙, 王涛. 2011. 河北金厂峪金矿控矿构造特征与成矿物质来源[J]. 地质学报, 85(1): 78-87.
- 宋扬, 王树志, 胡建中, 聂凤军, 谭应佳, 王志云. 2013. 冀东太古宙末期基底构造约束下的金成矿作用及演化[J]. 大地构造与成矿学, 37(3): 410-421.
- 孙大中. 1984. 冀东早前寒武地质[M]. 天津: 天津科学技术出版社.
- 孙金龙, 任云生, 杨玉山, 王强, 刘剑波, 张金江, 聂卫东, 王爱臣, 屈文俊. 2016. 冀东太平村钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 世界地质, 35(3): 738-751.
- 童潜明. 1986. 黄铁矿的钴、镍比值对矿床成因意义的讨论[J]. 矿产与地质, (3): 6-9.
- 魏俊浩, 刘丛强, 刘国春. 2003. 金矿测年方法讨论及定年中存在的问题[J]. 地学前缘, 10(2): 319-326.
- 徐昌涛, 贾斌. 1989. 冀东主要类型金矿床的成因及形成机理研究[C]//沈阳地质矿产研究所. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集 2 冀东地区. 北京: 地质出版社: 1-42.
- 徐国风, 邵洁莲. 1980. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质论评, 26(6): 541-546.
- 薛良伟, 庞继群, 王祥国, 周长命. 1999. 小秦岭 303 号石英脉流体包裹体 Rb-Sr、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 成矿年龄测定[J]. 地球化学杂志, 28(5): 473-478.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214-226.
- 于介江, 郭佳, 崔培龙. 2010. 延边海沟金矿床石英流体包裹体激光探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年与成矿背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 835-844.
- 袁继海, 詹秀春, 胡明月, 赵令浩, 孙冬阳. 2015. 基于元素对研究激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱分析硫化物矿物的基本效应[J]. 光谱学与光谱分析, 35(2): 512-518.
- 袁万明, 王世成, 王兰芬. 2001. 裂变径迹分析法研究河北南梁金矿床成矿时代及其热历史[J]. 矿物学报, 21(2): 225-230.
- 翟明国, 杨进辉, 刘文军. 2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. 中国科学(D辑), 31(7): 545-552.
- 张成喜. 1989. 金矿床地质学[M]. 沈阳: 东北工学院出版社.
- 张连昌, 白阳, 朱明田, 黄柯. 2018. 华北克拉通金矿床区域成矿差异性分析[J]. 地球科学与环境学报, 40(4): 363-380.
- 赵海香, 戴宝章, 李斌, 朱志勇. 2015. 小秦岭车仓峪钼矿成因研究: 辉钼矿 Re-Os 年龄及黄铁矿微量元素制约[J]. 岩石学报, 31(3): 784-790.

- 周芳春, 黄志飚, 刘翔, 苏俊男, 黄小强, 王臻, 陈虎, 张宗栋, 雉小荣, 李建斌, 李振红, 张立平, 曾乐, 李旭明. 2020. 湖南仁里铌钽矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 476-485.
- 周涛发, 张乐骏, 袁峰, 范裕, COOKE D R. 2010. 安徽铜陵新桥 Cu-Au-S 矿床黄铁矿微量元素 LA-ICP-MS 原位测定及其对矿床成因的制约[J]. 地学前缘, 17(2): 306-319.
- 邹滔, 王玉往, 王京彬, 张会琼, 赵路通, 解洪晶, 石煜, 刘永振, 刘贵权. 2016. 冀东下营坊金矿成矿年代学研究[J]. 地质与勘探, 52(1): 84-97.

References:

- BAI Y, ZHU M T, ZHANG L C, HUANG K, LI W J, GAO B Y. 2019. Auriferous pyrite Re-Os geochronology and He-Ar isotopic compositions of the Jinchangyu Au deposit in the northern margin of the North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 111: 102948.
- BAIDYA A S, SEN A, PAL D C, UPADHYAY D. 2020. Ore-forming processes in the Khetri Copper Belt, western India: constraints from trace element chemistry of pyrite and CO isotope composition of carbonates[J]. Mineralium Deposita, 56: 957-974.
- BAO Z, SUN W, LI C, ZHAO Z. 2014. U-Pb dating of hydrothermal zircon from the Dongping gold deposit in North China: constraints on the mineralization processes[J]. Ore Geology Reviews, 61: 107-119.
- BI Shi-jian, LI Jian-wei, ZHAO Xin-fu. 2008. Hydrothermal Zircon U-Pb Dating and Geochronology of Quartz Vein-Type Gold Deposits:A Review[J]. Geological Science and Technology Information, 27(1): 69-76(in Chinese with English abstract).
- BRALIA A, SABATINI G, TROJA F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. Mineralium Deposita, 14(3): 353-374.
- CHEN Guang-yuan, SUN Dai-sheng, YIN Hui-an. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House(in Chinese).
- CHEN Shao-cong, YE Hui-shou, WANG Yi-tian, ZHANG Xing-kang, LU Dong-yu, HU Hua-bin. 2014. Re-Os age of molybdenite from the Yuerya Au deposit in eastern Hebei Province and its geological significance[J]. Geology in China, 41(5): 1565-1576(in Chinese with English abstract).
- CHEN Wen, WAN Yu-sheng, LI Hua-qin, ZHANG Zong-qin, DAI Tong-mo, SHI Ze-en, SUN Jing-bo. 2011. Isotope Geochronology: Technique and Application[J]. Acta Geologica Sinica, 85(11): 1917-1947(in Chinese with English abstract).
- COOK N J, CIOBANU C L, MAO J W. 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougu gold ore deposits, North China Craton (Hebei Province, China)[J]. Chemical Geology, 264(1-4): 101-121.
- CRAIG J R, VOKES F M, SOLBERG T N. 1998. Pyrite: physical and chemical textures[J]. Mineralium Deposita, 34(1): 82-101.
- DEDITIUS A P, UTSUNOMIYA S, REICH M, KESLER S E, EWING R C, HOUGH R, WALSHE J. 2011. Trace metal nanoparticles in pyrite[J]. Ore Geology Reviews, 42(1): 32-46.
- DU An-dao, QU Wen-jun, LI Chao, YANG Gang. 2009. A Review on the Development of Re-Os Isotopic Dating Methods and Techniques[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).
- FOUGEROUSE D, MICKLETHWAITE S, TOMKINS A G, MEI Y, KILBURN M, GUAGLIARDO P, FISHER L A, HALFPENNY A, GEE M, PATERSON D, HOWARD D L. 2016. Gold remobilisation and formation of high-grade ore shoots driven by dissolution-reprecipitation replacement and Ni substitution into auriferous arsenopyrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 178: 143-159.
- FU Yun-lian, YE Bo-dan. 1991. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating of the gold deposit in Qingyuan, Guangdong province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 10(1): 21-28(in Chinese with English abstract).
- HART C J, GOLDFARB R J, QIU Yu-min, SNEE L, MILLER L D, MILLIER M L. 2002. Gold deposits of the northern margin of the North China Craton: multiple late Paleozoic-Mesozoic mineralizing events[J]. Mineralium Deposita, 37(3-4): 326-351.
- HU Fang-fang, FAN Hong-rui, YANG Jin-hui, WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi, ZHAI Ming-guo, JIN Cheng-wei. 2004. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon[J]. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1629-1636.
- KOGLIN N, FRIMMEL H E, MINTER W E L, BRÄTZ H. 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchean to Palaeoproterozoic placer deposits[J]. Mineralium Deposita, 45(3): 259-280.
- LARGE R R, DANYUSHEVSKY L, HOLLIT C, MASLENNIKOV V, MEFFRE S, GILBERT S, BULL S, SCOTT R, EMSBO P, THOMAS H, SINGH B, FORSTER J. 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and carlin-style sediment-hosted deposits[J]. Economic Geology, 104(5): 635-668.
- LARGE R R, MASLENNIKOV V V, ROBERT F, DANYUSHEVSKY L V, CHANG Z S. 2007. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant sukhoi log deposit, lena gold province, russia[J]. Economic Geology, 102(7): 1233-1267.
- LENG Cheng-biao. 2017. Genesis of Hongshan Cu polymetallic large deposit in the Zhongdian area, NW Yunnan: constraints from LA-ICPMS trace elements of pyrite and pyrrhotite[J]. Earth Science Frontiers, 24(6): 162-175(in Chinese with English abstract).

- LI Chao, QU Wen-Jun, DU An-Dao, ZHOU Li-Min. 2012. Study on Re-Os isotope in molybdenite containing common Os[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 702-708(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-bing, ZENG Fan-zhi. 2005. The pyrite's typomorphic characteris in gold deposit[J]. *Contributions To Geology and Mineral Resources Research*, 20(3): 199-203(in Chinese with English abstract).
- LI Hou-min, MAO Jing-wen, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, ZHANG Lian-chang. 2003. Ar-Ar Ages of K-feldspar and Quartz from Dongji Gold Deposit, Northwest Jiaodong, and Their Significance[J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 72-77(in Chinese with English abstract).
- LI J X, HU R Z, ZHAO C H, ZHU J J, HUANG Y, GAO W, LI J W, ZHUO Y Z. 2019b. Sulfur isotope and trace element compositions of pyrite determined by NanoSIMS and LA-ICP-MS: new constraints on the genesis of the Shuiyindong Carlin-like gold deposit in SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 55(7): 1279-1298.
- LI J X, ZHAO C H, HUANG Y, ZHUO Y Z, LI J W. 2019a. In-situ sulfur isotope and trace element of pyrite constraints on the formation and evolution of the nibao carlin-type gold deposit in SW China[J]. *Acta Geochimica*, 38: 555-575.
- LI Jing, SUN Ya-Li, HE Ke, XIAN Wei-Sheng, QIU Jian-Jun, ZHANG Xu. 2010. The improved molybdenite Re-Os dating method and its application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 642-648(in Chinese with English abstract).
- LI Jun-jian, SHEN Bao-feng, LUO Hui, ZHAI An-min, CAO Xiu-lan. 2002. Metallogenetic Epoch of Gold Deposit in Middle North Margin of North China Platform[J]. *Progress in Precambrian Research*, 25(3-4): 233-239(in Chinese with English abstract).
- LI Jun-jian, SHEN Bao-feng, MAO De-bao, LI Shuang-bao, ZHOU Hui-fang. 1996. Metallogenetic epochs of the Jiapigou gold deposit, Jilin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(4): 335-341(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-hua, GUI Xun-tang, CHENG Jing-ping, YIN Guo-qu. 1992. Rb-Sr and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of the Gaofeng gold deposit, Guangdong province[J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 367-373(in Chinese with English abstract).
- LI Y, SELBY D, CONDON D, TAPSTER S. 2017. Cyclic Magmatic-Hydrothermal Evolution in Porphyry Systems: High-Precision U-Pb and Re-Os Geochronology Constraints on the Tibetan Qulong Porphyry Cu-Mo Deposit[J]. *Economic Geology*, 112(6): 1419-1440.
- LI Zheng-yuan, YE Hui-shou, HE Wen, CAO Jin, ZHANG Xing-kang, WANG Sai, LU Dong-yu, LI Chao. 2014. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit in eastern Hebei Province[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1366-1378(in Chinese with English abstract).
- LIN C Y, HE Y N, CHEN X D, SHI L B, ZHANG X O, QI X Y, HAO R, GONG R X, ZHANG J L. 1995. Relationship between ductile shear zone and gold mineralization: Taking Jinchangyu gold mine, Eastern Hebei Province, China[J]. *Science China Chemistry*, 38(4): 466-477.
- LIN Zu-wei, ZHAO Xin-fu, XIONG Le, ZHU Zhao-xian. 2019. In-situ Trace Element Analysis Characteristics of Pyrite in Sanshandao Gold Deposit in Jiaodong Peninsula: Implications for Ore Genesis[J]. *Advances in Earth Science*, 34(4): 399-413(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-ming, ZHAO Shan-ren, SHEN Jie, JIANG Neng, HUO Wei-guo. 1998. Review on direct ISOtopic dating of hydrothermal ore-forming processes[J]. *Progress in Geophysics*, 13(3): 47-56(in Chinese with English abstract).
- LIU Ying-jun, MA Dong-sheng. 1991. *Geochemistry of gold*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- LÜ Gu-xian, KONG Qing-cun. 1993. *Geology of Linglong-Jiaojia Typical Gold Deposit in Jiaodong*[M]. Beijing: Science and Technology Press(in Chinese).
- LUO Wan-cheng, WU Qin-sheng. 1987. Metallogenetic ages of gold deposits in Jiaodong area by using altered minerals[J]. *Chinese Science Bulletin*, 32(16): 1245-1248(in Chinese).
- LUO Zhen-kuan, GUAN Kang, QIU You-shou, MIAO Lai-cheng, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2001. Zircon shrimp U-Pb dating of albite dyke in Jinchangyu gold mine, Jidong area, Hebei, China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 16(4): 226-231(in Chinese with English abstract).
- MAO Guang-zhou, HUA Ren-min, LONG Guang-ming, LU Hui-juan. 2008. Discussion on the Mineralogenetic Epoch of the Jinshan Gold Deposit, Jiangxi Province—Based on the Quartz Fluids Inclusion Rb-Sr Dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 532-540(in Chinese with English abstract).
- MAO J W, ZHANG Z C, ZHANG Z H, 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, MORGAN J. 1998. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS[J]. *Talanta*, 45(5): 935-946.
- MCDONOUGH W F. 2003. Compositional Model for the Earth's Core[J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 559-577.
- MEI Yan-xiong. 1997. The Metallogenetic Characteristics and Evolution of Gold Deposits in Jidong Region, Hebei Province, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, DONG Guang-yu, LIU Jian-guang, QU Wen-jun, YANG Zhu-seng, ZOU Li-yan, WAN Lu-jin, XIAO Mao-zhang. 2007. The Geological Characteristics and Re-Os Isotope Age of Molybdenite of the Xiongjishan Molybdenum Deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 946-951(in Chinese with English ab-

- stract).
- PAŠAVA J, SVOJTKA M, VESELOVSKÝ F, ĎURIŠOVÁ J, ACKERMAN L, POUR O, DRÁBEK M, HALODOVÁ P, HALUZOVÁ E. 2016. Laser ablation ICPMS study of trace element chemistry in molybdenite coupled with scanning electron microscopy (SEM) — An important tool for identification of different types of mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 874-895.
- PEI Rong-fu, MEI Yan-xiong. 2003. The evolution of the metallogenic provinces and ore-forming chronology — a case study of the metallogenic province in the northern margin of the North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- RAITH J G, STEIN H J. 2000. Re-Os dating and sulfur isotope composition of molybdenite from tungsten deposits in western Namaqualand, South Africa: implications for ore genesis and the timing of metamorphism[J]. *Mineralium Deposita*, 35(8): 741-753.
- REICH M, KESLER S E, UTSUNOMIYA S, PALENIK C S, CHRYSSOULIS S L. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781-2796.
- SIMON G. 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks Carlin-type gold deposit, Nevada. Implications for gold deposition[J]. *Economic Geology*, 94(3): 405-422.
- SONG Yang, JIANG Si-hong, BAGAS L, LI Chao, HU Jian-zhong, ZHANG Qing, ZHOU Wei, DING Hai-Yang. 2016. The geology and geochemistry of Jinchangyu gold deposit, North China Craton: Implications for metallogenesis and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 313-329.
- SONG Yang, WANG Rui-jiang, HU Jian-zhong, TAN Ying-jia, SHI Chen-long, WANG Tao. 2011. Ore-controlling Structure Characteristic and the Sources of Ore Forming Material in the Jinchangyu Gold Deposit, Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 78-87(in Chinese with English abstract).
- SONG Yang, WANG Shu-zhi, HU Jian-zhong, NIE Feng-jun, TAN Ying-jia, WANG Zhi-yun. 2013. Gold Mineralization and Evolution Under Structural Constraints of the Basement in the Jidong Area, North China Craton[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 37(3): 410-421(in Chinese with English abstract).
- STEIN H J, MARKEY R J, MORGAN J W, HANNAH J L, SCHERSTÉN A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works[J]. *Terra Nova*, 13(6): 479-486.
- STEIN H J. 2006. Low-rhenium molybdenite by metamorphism in northern Sweden: Recognition, genesis, and global implications[J]. *Lithosphere*, 87(3): 300-327.
- STEIN H, SCHERSTEN A, HANNAH J, MARKEY R. 2003. Sub-grain-scale decoupling of Re and ^{187}Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(19): 3673-3686.
- SUN Da-zhong. 1984. The Early Precambrian Geology of the Eastern Hebei[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press(in Chinese).
- SUN Jin-long, REN Yun-sheng, YANG Yu-shan, WANG Qiang, LIU Jian-bo, ZHANG Jin-jiang, NIE Wei-dong, WANG Ai-chen, QU Wen-jun. 2016. Re-Os isotopic dating of molybdenite from Taipingcun Mo deposit in eastern Hebei and its geological significance[J]. *Global Geology*, 35(3): 738-751(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. The continental crust[M]. UK: Blackwell Scientific Publications.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241-265.
- TONG Qian-ming. 1986. The significance of cobalt-nickel ratio of pyrite to deposit genesis[J]. *Mineral Resources and Geology*, (3): 6-9(in Chinese).
- TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, RIBOULLEAU A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update[J]. *Chemical Geology*, 232(1-2): 12-32.
- WANG H Q, GAO W S, DENG X D, LI J W. 2020. Zircon U-Pb dating reveals Late Jurassic gold mineralization in the Jidong district of the northern North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 126: 103798.
- WEI Jun-hao, LIU Cong-qiang, LIU Guo-chun. 2003. Method of dating of gold deposit and the related problems[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 319-321(in Chinese with English abstract).
- XU Chang-tao, JIA Bin. 1989. Study on the genesis of major types of gold deposits and its formation mechanism in east of Hebei[C]//Shenyang Center of China Geological Survey. Collected Works on the Regional Metallogenetic Condition of the Major Types of Gold Deposits in China. 2 East of Hebei Area. Beijing: Geological Publishing House: 1-42(in Chinese).
- XU Guo-feng, SHAO Jie-lian. 1980. On the type peculiarities of pyrite and their practical significance[J]. *Geological Review*, 26(6): 541-546(in Chinese).
- XU Xing-wang, CAI Xin-ping, LIU Yu-lin, ZHANG Bao-lin. 2002. Laser probe ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of metasomatic K-feldspar from the Hougu gold deposit, northwestern Hebei Province, China[J]. *Science in China*, 45(6): 559-564.
- XUE Liang-wei, PANG Ji-xiang, WANG Xiang-guo, ZHOU Chang-ming. 1999. Rb-Sr and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of fluid inclusion of the No-303 quartz vein in Xiaoqinling region[J]. *Geochimica*, 28(5): 473-478(in Chinese with English abstract).
- YAN Yu-tong, LI Sheng-rong, JIA Bao-jian, ZHANG Na, YAN Li-na. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 214-226(in Chinese with English abstract).
- YU Jie-jiang, GUO Jia, CUI Pei-long. 2010. Ore-Forming Geo-

- logic Settings and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Laser Probe Dating of Fluid Inclusions in Quartzs from Haigou Gold Deposit, Yanbian City, Northeastern China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(4): 835-844(in Chinese with English abstract).
- YUAN Ji-hai, ZHAN Xiu-chun, HU Ming-yue, ZHAO Ling-hao, SUN Dong-yang. 2015. Characterization of Matrix Effects in Microanalysis of Sulfide Minerals by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry Based on An Element Pair Method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 35(2): 512-518(in Chinese with English abstract).
- YUAN Wan-ming, WANG Shi-cheng, WANG Lan-feng. 2001. Apatite and Zircon fission track study on the mineralization age and its thermal history of nanliang gold deposit, eastern Hebei, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 21(2): 225-230(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, YANG Jin-hui, LIU Wen-jun. 2001. Large clusters of gold deposits and large-scale metallogenesis in the Jiaodong Peninsular[J]. Science in China (Series D), 31(7): 545-553(in Chinese).
- ZHANG Cheng-xi. 1989. Gold geology[M]. Shenyang: Northeast Institute of Technology Press(in Chinese).
- ZHANG Lian-chang, BAI Yang, ZHU Ming-tian, HUANG Ke. 2018. Regional Differences of Gold Deposits on the North China Craton[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 40(4): 363-380(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Hai-xiang, DAI Bao-zhang, LI Bin, ZHU Zhi-yong. 2015. Genesis of the Checangyu molybdenum deposit in the Xiao-qinling district: Constraints from the Re-Os dating of molybdenite and in situ trace element analysis of pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(3): 784-790(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Fang-chun, HUANG Zhi-biao, LIU Xiang, SU Jun-nan, HUANG Xiao-qiang, WANG Zhen, CHEN Hu, ZHANG Zong-dong, LUO Xiao-rong, LI Jian-bin, LI Zhen-hong, ZHANG Li-ping, ZENG Le, LI Xu-ming. 2020. Re-Os Dating of Molybdenite from the Renli Nb-Ta Deposit, Hunan Province, and its Geological Significance[J]. Geotectonica et Metallogenicia, 44(3): 476-485(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Tao-fa, ZHANG Le-jun, YUAN Feng, FAN Yu, COOKE D R. 2010. LA-ICP-MS in situ trace element analysis of pyrite from the Xinqiao Cu-Au-S Deposit in Tongling, Anhui, and its constraints on the ore genesis[J]. Earth Science Frontiers, 17(2): 306-319(in Chinese with English abstract).
- ZOU Tao, WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, ZHANG Hui-qiong, ZHAO Lu-tong, XIE Hong-jing, SHI Yu, LIU Yong-zhen, LIU Gui-quan. 2016. Geochronology of the Xiayingfang Au Deposit in Eastern Hebei Province[J]. Geology and Exploration, 52(1): 84-97(in Chinese with English abstract).

Supplementary Table 1 Composition of trace elements in pyrite collected from Jinchangyu gold deposit (unit of element content: 10^{-6})

	JC-19-1	JC-19-2	JC-19-3	JC-19-4	JC-19-5	JC-22-1	JC-22-2	JC-22-3	JC-22-4	JC-22-5	均值	标准差	最大值	最小值
Co	297.80	407.40	930.10	318.9	506.90	49.72	24.50	112.70	267.90	488.20	340.41	267.80	930.10	24.50
Ni	84.05	148.90	103.10	69.50	79.47	46.93	32.14	236.90	82.06	66.77	94.98	59.01	236.90	32.14
Cu	138.90	22.75	39.89	15.25	4.19	7.51	14.28	1.80	2.48	9.57	25.66	41.40	138.90	1.80
Zn	6.44	12.51	32.64	158.20	5.68	4.66	3.82	5.85	3.64	2.87	23.63	48.11	158.20	2.87
Pb	14 468.00	94.89	111.60	1 110.00	54.49	137.60	210.40	—	0.34	124.20	1812.39	4 757.83	14 468.00	BDL
Bi	1 696.00	26.92	37.49	121.30	9.56	13.96	26.28	0.01	0.16	14.06	194.57	528.71	16 96.00	0.01
As	0.76	4.89	1.43	0.54	0.70	—	0.44	0.44	—	0.47	1.21	1.52	4.89	BDL
Au	0.17	6.36	1.31	2.67	0.36	0.64	0.41	—	0.18	0.16	1.36	2.04	6.36	BDL
Ag	42.66	53.72	1.84	8.21	0.38	2.92	3.08	—	0.01	0.43	12.58	20.52	53.72	BDL
Mo	4.44	46.14	11.52	4 718.00	875.70	0.18	34.30	0.57	0.05	—	632.32	1 558.50	4 718.00	BDL
Ti	11.73	47.46	12.01	85.08	18.04	73.02	5 788.20	28.12	40.31	27.26	613.12	1 818.51	5 788.20	11.73
V	0.04	3.97	0.26	5.55	0.18	—	13.60	—	0.45	—	3.43	4.99	13.60	BDL
Ge	5.12	3.15	1.89	4.13	4.69	0.56	4.60	2.25	4.40	2.63	3.34	1.48	5.12	0.56
Cr	3.81	13.32	4.99	215.70	3.55	4.93	16.87	3.32	7.22	0	30.41	69.65	215.70	BDL
Mn	2.63	3.04	1.56	5.55	0.96	1.91	2.63	2.97	3.61	2.90	2.77	1.25	5.55	0.96
Sb	0.02	—	0.10	—	—	—	0.18	—	—	0.05	0.09	0.07	0.18	BDL
Ga	1.75	1.30	0.36	0.46	0.13	0.66	2.24	0.40	—	—	0.91	0.76	2.24	BDL
Zr	—	0.76	1.74	0.21	0.41	—	0.53	0.21	0.14	0.08	0.51	0.55	1.74	BDL
Hf	—	—	—	0.35	—	—	—	—	—	—	0.22	0.18	0.35	BDL
Nb	0.02	—	—	0.32	0.01	—	11.41	—	0.11	0.08	1.99	4.62	11.41	BDL
Ta	—	0.05	0.02	—	0.01	—	0.10	—	—	—	0.04	0.04	0.05	BDL
Th	—	0.07	—	—	—	—	0.09	—	0.01	—	0.05	0.04	0.09	BDL
U	—	—	—	—	—	—	0.02	0.10	0.26	—	0.13	0.12	0.26	BDL
Co/Ni	3.54	2.74	9.02	4.59	6.38	1.06	0.76	0.48	3.27	7.31	3.92	2.91	7.31	0.48

注: “—”表示低于检测限值(BDL), 不参与平均值及标准差的计算, 下文同。