

辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义

张 朋^{1,2}, 李 斌³, 李 杰⁴, 柴 鹏¹, 王希今², 沙德铭², 时建民²

(1.吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2.沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110034; 3.辽宁省丹东青城子矿业有限公司, 辽宁 丹东 118107; 4.中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 白云金矿是辽东裂谷区内重要的大型金矿之一, 长期以来缺少直接的年代学数据。本次对白云金矿不同矿石类型中的 8 件载金黄铁矿进行了 Re-Os 同位素定年, 获得其等时线年龄为 225.3 ± 7.0 Ma (MSWD=5.8), $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 2.1 ± 2.8 。结合前人的研究成果及本次年代学研究得出: 白云金矿形成于印支期, 其成矿物质主要为壳源, 白云金矿是与印支期岩浆活动有关的热液矿床; 其形成构造背景可能为受蒙古-鄂霍次克大洋向南北两侧俯冲之后的陆内后碰撞造山环境。本次研究也为今后在辽东裂谷区寻找与印支期岩浆活动有关的矿床提供了依据。

关键词: Re-Os 年代学; 载金黄铁矿; 矿床成因; 白云金矿; 辽东裂谷

中图分类号: P611; P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2016)04-0731-008

辽东裂谷是我国重要的金矿成矿区, 裂谷内分布着一系列大、中、小型金矿床(矿点), 如: 白云金矿、猫岭金矿、小佟家堡子金矿、四道沟金矿、五龙金矿、岫岩金矿等。该区金资源潜力巨大, 新近又发现了林家、杨树、桃园等中小型金矿(薛春纪等, 2003)。白云金矿是辽东裂谷区内重要的大型金矿之一, 近年在矿区及其外围找矿取得了重大突破, 最新探获黄金资源储量达 31.7 t, 平均品位为 2.85 g/t。该矿床自发现以来在矿床地质特征、成矿物质来源、控矿构造特征和矿床成因等方面进行了大量研究, 取得了较多成果(陈锦荣等, 1995; 张宝华等, 1996; 刘国平和艾永富, 1999, 2000, 2002; 王富春, 2002; 郎福全等, 2007; 赵鸿志等, 2009; 杨新库, 2011), 但在成矿时代方面仍存在较大争议, 主要观点有: (1)涂光炽

(1984)认为白云金矿为与区域变质事件同期的变质热液矿床; (2)赵玉福和杨宗恩(1982)认为成矿时代为燕山期; (3)刘国平和艾永富(2000)采用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 中子活化、阶段加热法测定硅钾蚀变岩中含矿石英, 认为矿床形成于印支期。上述确定矿床成矿时代的方法均为通过测试与成矿有关的岩体或地层, 即通过间接方法确定成矿时代, 至今尚无直接的年代学数据报道。近年, 随着科学技术的发展, 更直接、更准确的矿石矿物年龄测年技术逐渐成熟, 测定金属硫化物的形成年龄是确定成矿年龄的最直接和可靠的依据, Re-Os 同位素体系在金属矿床直接精确定年方面发挥着越来越大的作用(蒋少涌等, 2000), 目前该定年方法除了大量应用于辉钼矿之外(赵芝等, 2012; 吴云辉等, 2013), 对一些 Re、Os 含量低的硫

收稿日期: 2014-03-29; 改回日期: 2014-08-27

项目资助: 国家自然科学基金青年基金(41501093)和中国地质调查局项目(12120113058700)联合资助。

第一作者简介: 张朋(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事成矿理论与找矿预测研究工作。Email: geozhangpeng2010@163.com

化物亦有许多成功案例(Stein et al., 2000; Arne et al., 2001; 毛景文等, 2001)。本文系统分析测定白云金矿石英硫化物和硅钾蚀变岩矿石中载金黄铁矿的 Re-Os 同位素组成, 为成矿时代、矿床成因、找矿方向以及成矿动力学背景提供依据。

1 成矿地质背景

白云金矿位于华北克拉通北缘东段辽东裂谷区(图 1)。辽东裂谷区是在太古宙克拉通基底之上发展的, 裂谷演化经历了拉伸裂陷、沉积、底辟侵入、挤压褶皱、隆升拆离消亡等 5 个过程(翟安民等, 2005), 主要由古元古界辽河群和不同演化阶段岩浆岩组合组成。辽河群为一套绿片岩相与角闪岩相变质岩系, 下部为浪子山组火山岩-碎屑岩建造, 主要产 Cu-Co 矿, 中部为大石桥组碳酸盐建造, 主要产 Pb-Zn 矿, 上部为盖县组碎屑岩-火山碎屑岩建造, 是 Au、Ag 的主要赋矿层位。古元古代中期裂谷消亡之后, 区域经历了多次构造热事件, 包括地壳重熔钠质花岗岩侵入, 印支期-燕山期岩浆活动等(薛春纪等, 2003)。

2 矿床地质特征

白云金矿位于辽东裂谷中段, 矿区出露地层有辽河群盖县组片岩和大石桥组大理岩, 矿区构造较为复杂, 其中对金成矿影响最大的为呈东西向展布的滑脱构造带, 该构造带地表延长 8500 m, 倾斜深

度大于 1000 m, 宽 1~40 m, 其主要构造面位于盖县组和大石桥组接触部位(图 2)。矿区见有闪长玢岩脉、石英斑岩脉, 闪长玢岩主要呈北西向定位, 石英斑岩则呈近东西向断续出露在滑脱构造带中, 石英斑岩与金成矿密切相关, 与金矿脉呈平行产出(图 3)。

白云金矿矿体呈脉状、扁豆状分布在蚀变带中, 具有分支复合、尖灭再现特点(图 2), 矿石类型主要有硅钾蚀变岩型和石英硫化物脉型, 矿石的矿物组合较为简单, 金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁铁矿等, 黄铁矿是主要载金矿物, 自然金呈不规则粒状、脉状分布于黄铁矿中及其边部, 非金属矿物有石英、正长石、白云母、石墨、绿泥石等, 矿石结构主要有自形粒状、自形-半自形粒状(图 4a)、细脉浸染状结构(图 4b), 构造有团块状、细脉状和角砾状构造。白云金矿围岩蚀变明显, 主要有硅化、钾长石化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化等。

3 样品采集与测试方法

本次研究样品均取自白云金矿井下, 考虑到样品的代表性, 分别采集白云金矿主成矿阶段代表性样品石英-硫化物矿石 6 件(图 5a)和硅钾蚀变岩矿石 2 件(图 5b)。分别挑选黄铁矿进行 Re-Os 同位素定年。

Re-Os 同位素组成在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室测定, 具体的分析测试流程如下:

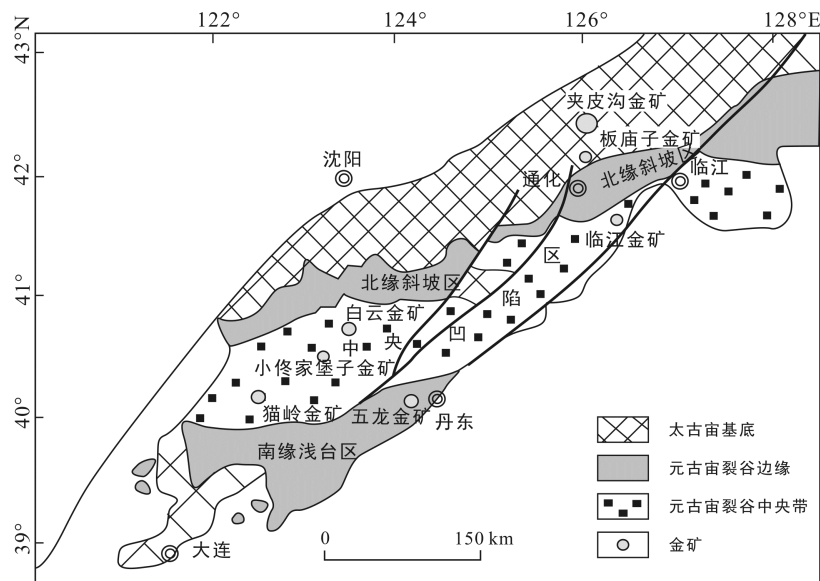


图 1 辽东裂谷区金矿床分布略图(据白瑾, 1993)

Fig.1 Distribution of gold deposits in Liaodong rift

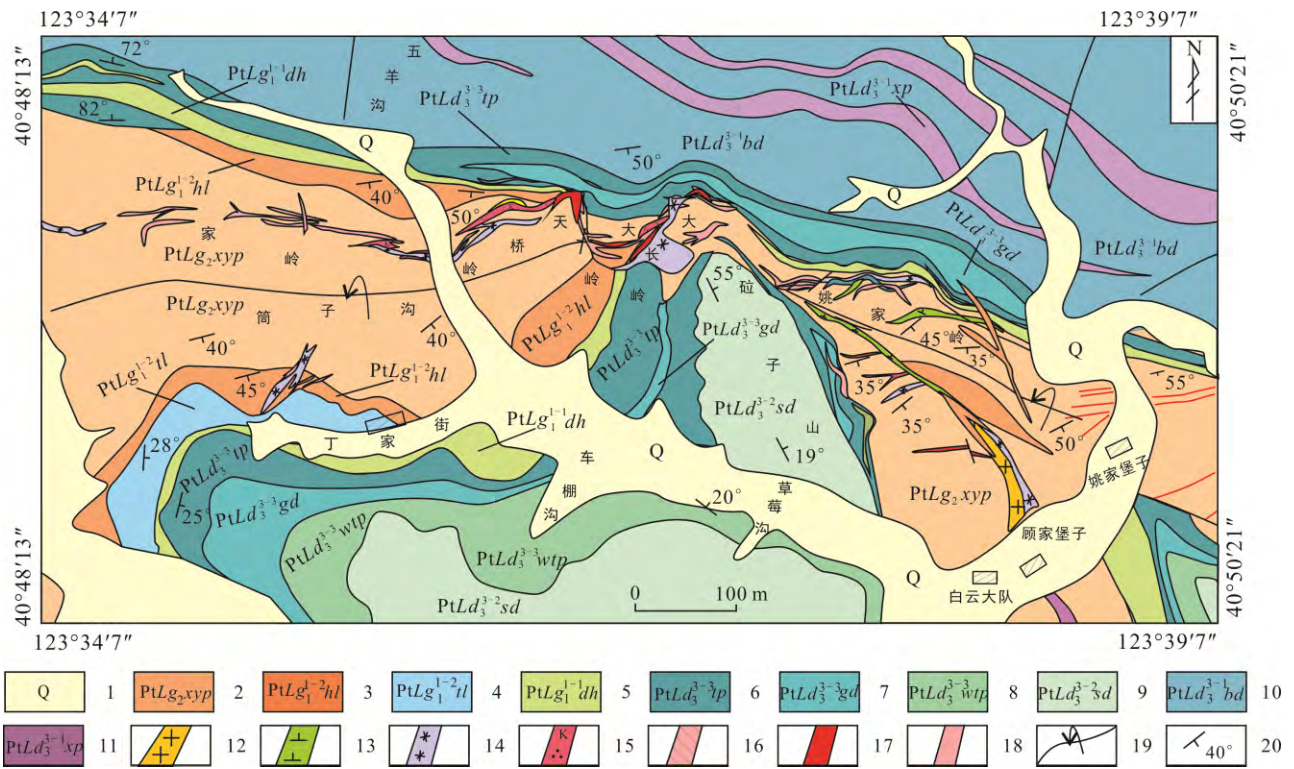
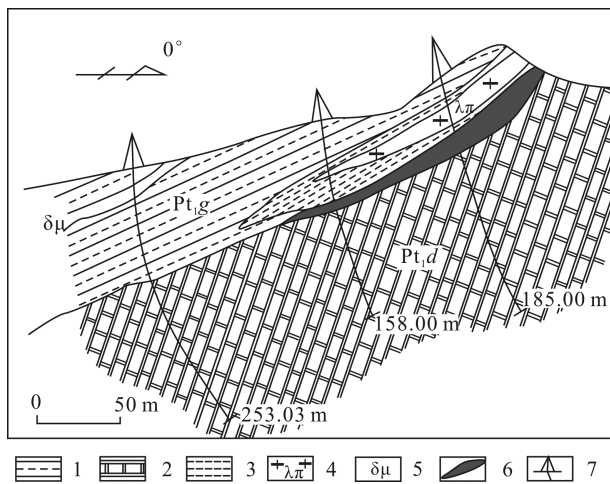


图 2 白云金矿地质简图(据辽宁有色 103 地质队资料修改)

Fig.2 Sketch geological map of the Baiyun gold deposit



1. 辽河群盖县组片岩; 2. 辽河群大石桥组大理岩; 3. 石英斑岩; 4. 闪长玢岩 5. 硅钾蚀变岩; 6. 金矿体; 7. 钻孔。

图 3 白云金矿 5 线地质剖面图(据辽宁有色 103 地质队资料修改)

Fig.3 Geological section along line No.5 of the Baiyun gold deposit

准确称取 1~2 g 样品于 Carius 管中, 加入适量的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 稀释剂, 在冷冻的条件下分别加入 2.5 mL 浓 HCl 和 7.5 mL 浓 HNO_3 。将封闭的 Carius 管在 240 加热 24~48 h。待分解并冷却后, 将 Carius 管打开, 离心, 将上部清液转移至 30 mL PFA 瓶中, 用 4 mL 的冰冷的 CCl_4 萃取 3 遍, 合并 CCl_4 并加入 4 mL 浓 HBr, 在红外灯下使 OsO_4 与 HBr 完全反应, 这时 OsO_4 被还原成 OsBr_6^{2-} , 反萃取至 HBr 相, 分离出该相, 并在 130 加热蒸干。最后 Os 用微蒸馏法进行纯化。Re 采用 AG1X8 阴离子树脂进行分离和纯化。

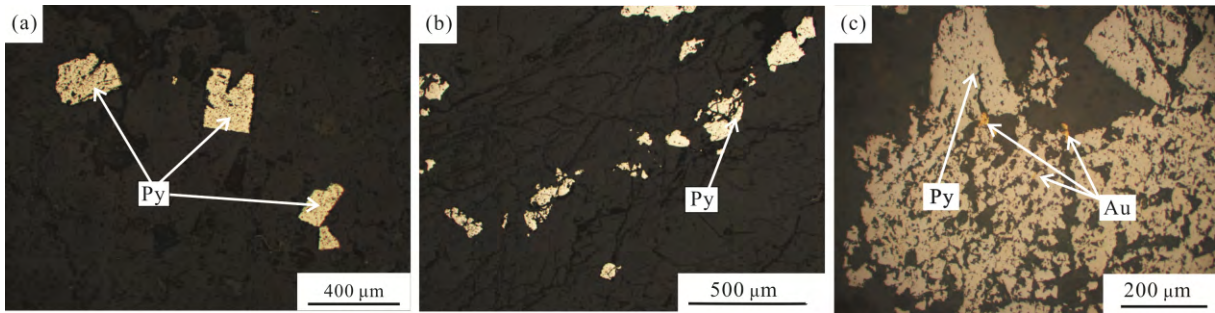
Os 同位素组成测定是在 Triton 型热电质谱仪(美国 Thermo-Fiser 仪器公司)上完成。采用二次电子倍增器(SEM)动态跳峰方式测定 OsO_3^- (质量数分别为 233, 235, 236, 237, 238, 240)。分析结果脱机处理, 首先采用逐级剥氧法以等概率模型进行氧校正, 然后通过 $^{192}\text{Os}/^{188}\text{Os}=3.08271$ 校正仪器的质量分馏, 最后计算扣除稀释剂对样品 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值

的贡献。Re 含量测量在 Xseries-2 型电感耦合等离子体质谱(美国 Thermo-Fiser 仪器公司)上完成。全流程的 Os 空白为 0.3~0.8 pg, Re 为 5~14 pg, 对测量结果的影响可以忽略。

4 Re-Os 同位素测试结果

6 件石英硫化物型矿石和 2 件硅钾蚀变岩型

矿石的 Re-Os 同位素测试结果列于表 1。6 件石英脉型矿石 Re 含量介于 5.552~7.929 ng/g, Os 含量介于 0.014~ 0.021 ng/g。2 件硅钾蚀变岩型矿石 Re 含量 5.544~6.581 ng/g, Os 含量 0.018~0.020 ng/g。应用 ISOPLLOT 程序求得 8 件矿石的等时线年龄(2σ)为 225.3±7.0 Ma, 初始 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值为 2.1±2.8, MSWD 为 5.8, 8 个测试点可以拟合一条十分理想的等时线(图 6)。



(a) 自形-半自形粒状黄铁矿; (b) 细脉浸染状黄铁矿; (c) 黄铁矿与自然金共生。矿物名称缩写: Au. 自然金, Py. 黄铁矿。

图 4 白云金矿矿石显微照片

Fig.4 Microphotographs of ores from the Baiyun gold deposit

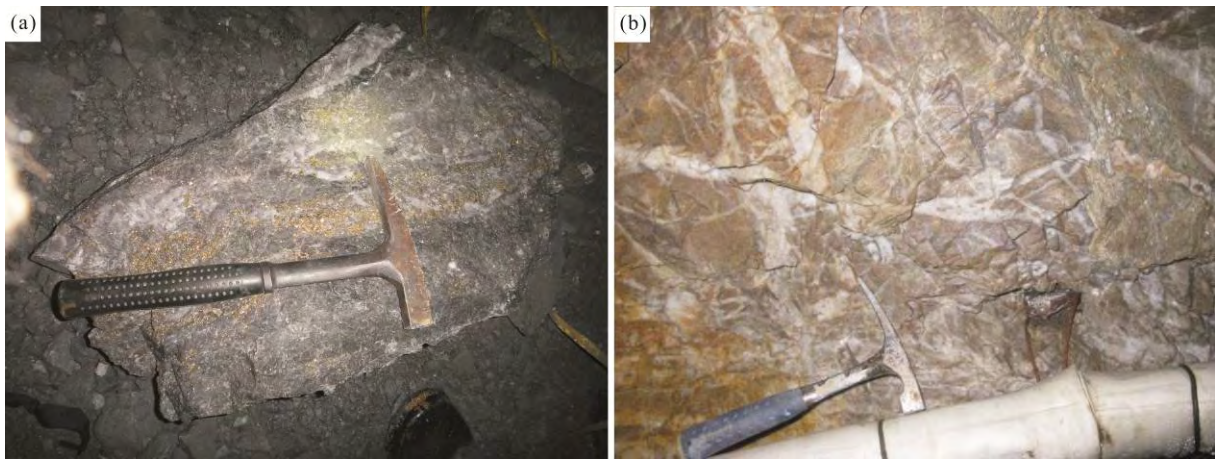


图 5 白云金矿井下石英-硫化物脉(a)和硅钾蚀变岩(b)

Fig.5 Auriferous quartz vein (a), silicified and K-feldspathized rock (b) of the Baiyun gold deposit

表 1 白云金矿黄铁矿 Re-Os 同位素组成分析结果

Table 1 Re-Os isotopic compositions of pyrite from the Baiyun gold deposit

样品号	岩石类型	Re(ng/g)	2σ	Os(ng/g)	2σ	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	2σ	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	2σ
BYRE-1	石英硫化物型金矿石	5.721	0.048	0.015	0.00013	19891	239	76.24	0.69
BYRE-2	石英硫化物型金矿石	5.65	0.053	0.014	0.0002	35918	608	135.83	1.27
BYRE-3	石英硫化物型金矿石	7.929	0.13	0.021	0.00018	23952	444	91.92	1.12
BYRE-4	石英硫化物型金矿石	5.552	0.098	0.015	0.00008	23442	430	90.89	0.54
BYRE-5	石英硫化物型金矿石	6.36	0.102	0.016	0.0002	61787	1271	236.3	1.51
BYRE-6	石英硫化物型金矿石	6.383	0.076	0.017	0.00008	21584	274	84.34	0.52
BYRE-7	硅钾蚀变岩型矿石	6.581	0.114	0.018	0.00014	15003	287	56.04	0.64
BYRE-8	硅钾蚀变岩型矿石	5.544	0.088	0.02	0.00007	5895	96	25.66	0.15

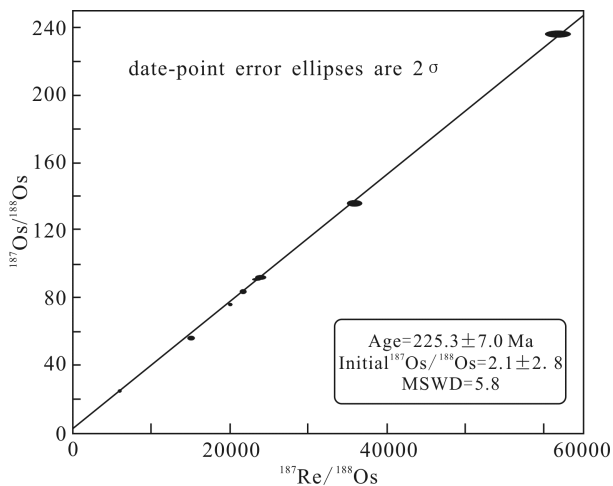


图6 白云金矿黄铁矿的 Re-Os 等时线图

Fig.6 Re-Os isochron of pyrite from the Baiyun gold deposit

5 讨论

5.1 成矿时代

辽东裂谷区金矿成矿年代学研究始终是我国地质学者研究的热点, 长期以来, 在该地区获得了大量的金矿成矿年龄数据, 魏俊浩等(2003)测定五龙金矿主成矿阶段石英流体包裹体获得 Rb-Sr 等时线年龄为 120 Ma; 刘国平和艾永富(2000)采用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 阶段加热法测定小佟家堡子变粒岩型金矿石中绢云母得出成矿年龄为 167 Ma; 薛春纪等(2003)对小佟家堡子金矿含金硅化岩进行全岩 Rb-Sr 法定年获得 233 Ma 年龄, 而采用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 快中子活化法测定含石英获得 239 Ma; 对高家堡子银矿进行石英流体包裹体 Rb-Sr 法定年获 234 Ma, 采用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 快中子活化法测年获得 240 Ma。对白云金矿前人同样做了大量年代学研究, 分别采用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 快中子活化法和阶段加热法测定含金硅钾蚀变岩中分离出来的含石英, 获得 196~197 Ma 和 207~209 Ma 年龄(刘国平和艾永富等, 2000); 采用全岩 K-Ar 法测定硅钾蚀变岩和有关脉岩, 获得 6 件硅钾蚀变岩 K-Ar 表面年龄 166~303 Ma, 5 件石英斑岩年龄 74~198 Ma(叶柏舟等, 1986); 最近中国地质科学院矿产资源研究所采用 Rb-Sr 法测定白云金矿石英-硫化物阶段石英流体包裹体, 获得等时线年龄 392 Ma(个人交流)。上述测年方法存在较大争议, 误差分歧也较大, 甚至对同一类型样品采用不同的测试方法, 得出的年龄数据相差十分悬殊, 故不能确定其真实的成矿时代。

众所周知, 对矿床成矿年龄的测定必须重视 3

个内容: (1)样品是否为金矿石或者代表金矿化作用; (2)测试样品是否与金成矿同期形成; (3)测试样品是否可以确定金矿成矿事件的年龄(石贵勇等, 2012)。按上述三个标准考量前人获得的成果, 目前对白云金矿定年和测试均存在缺陷, 采用 Rb-Sr 法定年存在诸多不确定因素, 如 Rb-Sr 体系中 Rb 的活动性很强导致 Rb-Sr 体系封闭性差; K-Ar 法易于受到后期热事件影响, 造成 Ar 的丢失, 从而使 K-Ar 表面年龄跨度过大; ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年同样存在过剩 Ar 和 Ar 丢失事件(陈文等, 2011)。

考虑到上述方法的局限性, 本次选用具有高精度、高灵敏度的热电离质谱仪 Triton 对白云金矿石英硫化物矿石和硅钾蚀变岩矿石中黄铁矿进行 Re-Os 同位素测定, 获得黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 225.3 ± 7.0 Ma。我们认为该年龄能够更真实反映白云金矿床成矿年龄, 理由如下: Re-Os 同位素体系封闭性较好, 不容易受后期构造热事件的改造, 能比较准确地测定成矿时代, 而且最新研究成果显示, 通过测定载金黄铁矿 Re-Os 同位素组成从而确定金成矿时代方面也取得了较大成功(石贵勇等, 2012; Ming et al., 2013), 黄铁矿是矿石中主要的金属矿物, 是本矿床的主要载金矿物, 矿石中金的含量与黄铁矿的含量呈正相关的关系, 根据光片和电子探针查证, 金绝大多数赋存在黄铁矿中或与黄铁矿密切共生(图 4c), 大部分呈显微金独立矿物(自然金、银金矿)以包体金、晶隙金及裂隙金状态赋存在黄铁矿晶体内, 同时前人从硅钾蚀变岩型矿石和石英脉型矿石中挑选出黄铁矿, 并对两种类型矿石中黄铁矿的含 Au 量进行测试, 测试结果表明前者 Au 含量介于 267.1%~991.4%, 后者 Au 含量介于 179.7%~1793.5% (国家辉和程德琳, 1993), 故从载金矿物角度出发, 含金黄铁矿是白云金矿床最佳测年对象, 通过上述分析, 本文测试得到的 225.3 ± 7.0 Ma 的年龄代表白云金矿的成矿年龄。

5.2 矿床成因、成矿动力学背景及其地质意义

近些年, 随着精细年代学测试技术的发展, 在白云金矿及其外围识别出大量印支期岩浆活动, 段晓侠等(2011)对白云金矿南侧双顶沟岩体进行锆石 U-Pb 定年结果为 224 Ma; Yu et al. (2009)对新岭岩体进行年代学分析得出 225 Ma 年龄; 关广岳和金成洙(1983)测定与白云金矿矿脉平行展布的石英斑岩成岩年龄为 220~300 Ma; 刘国平和艾永富(2002)对小佟家堡子金矿区的煌斑岩进行 K-Ar 测年得出 211~130 Ma 的年龄。同时, 在该地区识别出印支期成矿

事件, Yu et al. (2009)对榛子沟铅锌矿的闪锌矿 Rb-Sr 等时线定年得出 221 Ma 年龄; 薛春纪等(2003)对小佟家堡子金矿和高家堡子银矿进行成矿年代学研究也得出印支期成矿的年龄, 结合本次对白云金矿进行黄铁矿 Re-Os 定年得出 225.3 ± 7.0 Ma 年龄, 说明该区至少有一期与印支期岩浆活动相关的成矿作用。据航磁和重力资料显示, 白云金矿处于一个重力低异常之中, 其深部可能存在隐伏花岗岩体, 且可能被花岗岩兜底(芮宗瑶等, 1994)。白云金矿产于东西向展布的滑脱构造带中, 中国东部中生代受太平洋板块作用影响, 印支期主构造方向为东西向, 并逐渐向北东向转化, 控矿构造与印支期构造方向相同, 并与印支期石英斑岩平行展布, 因此白云金矿是与印支期岩浆活动有关的热液矿床。

华北克拉通北缘东段自印支期西伯利亚克拉通与华北克拉通拼合成统一体, 先后经历了碰撞、岩石圈减薄、拆沉、伸展等地质作用, 从而导致大规模成矿作用的发生。毛景文等(2003)通过对中国北方大规模成矿作用及地球动力学背景分析认为, 华北克拉通在三叠纪晚期到侏罗纪中期一定程度上仍然处于西伯利亚板块与华北板块碰撞造山阶段, 并在造山的松弛阶段形成大量花岗岩浆上侵定位。任纪舜等(1992)认为, 印支末期到早中燕山期, 西伯利亚克拉通与华北克拉通之间的蒙古-兴安造山带发生了强烈的逆掩-推覆作用, 形成逆掩断层、飞来峰和构造窗, 标志华北克拉通与西伯利亚克拉通之间的大陆岩石圈进一步缩短, 说明中国北方处于陆内后碰撞造山环境。其主要的动力源为 160 Ma 最终闭合的蒙古-鄂霍次克大洋向南北两侧的俯冲(赵越等, 2002)。本次获得的白云金矿 225.3 ± 7.0 Ma 成矿年龄, 与前人获得的与成矿密切的石英斑岩成岩时代一至, 指示其为印支晚期构造-岩浆及其相关流体活动的产物, 成矿动力学背景可能为受蒙古-鄂霍次克大

洋向南北两侧俯冲影响的内陆后碰撞造山环境。

Re-Os 同位素体系在矿床学中的另一个应用就是示踪成矿物质来源, 并取得的许多成功案例(李超等, 2012), 由于地壳相对富集 Re, 地壳物质的加入将会导致放射成因 ^{187}Os 含量的增加, 相应的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值也会增大, 白云金矿载金黄铁矿样品普遍具有较高放射成因的 ^{187}Os 含量, 其 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始加权平均值为 2.1 ± 2.8 , 由于误差较大, 仅具有参考价值, 尽管如此, 其比值明显不同于各类原始地幔 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值(0.105~0.152) (Walker and Morgan, 1989; Shirey and Walker, 1998), 更接近于各类地壳的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值(0.8~1.3)(Esser and Turekian, 1993; Saal et al., 1998), 野外地质调查发现, 区域地层中硫化物较少, 而白云金矿的赋矿围岩中硫化物普遍发育, 结合本次获得的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值, 推测成矿物质主要来源于壳源, 是否有幔源物质加入还有待进一步研究。

前人对中国北方成矿时代进行详细的归纳、研究和总结, 认为中国北方存在三大成矿期次, 分别为 200~160 Ma、140 Ma 和 120 Ma(毛景文等, 2003; 翟明国等, 2003), 本文所获得的白云金矿 225.3 ± 7.0 Ma 成矿年龄明显早于三大成矿期, 结合前人在该区获得的成矿年龄(表 2), 推测中国北方有可能存在第四大成矿期或代表辽东裂谷地区早中生代内生金、银矿的成矿期, 同时也为在该区寻找与印支期成矿有关的矿床提供重要信息和线索。

6 结 论

通过对白云金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年研究, 得出如下结论:

(1) 白云金矿石英-硫化物和硅钾蚀变岩载金黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 225.3 ± 7.0 Ma, 结合控矿

表 2 中国北方印支期成矿年代学格架
Table 2 Isotopic ages of Indosinian mineralization in North China

矿点	测年方法	年龄(Ma)	数据来源
榛子沟	闪锌矿Rb-Sr	221±12	Yu et al., 2009
喜鹊沟	黄铁矿Rb-Sr	225	Yu et al., 2009
白云金矿	石英流体包裹体 ^{40}Ar - ^{39}Ar	196~209	刘国平和艾永富, 2000
小佟家堡子金矿	石英体包裹体Rb-Sr和 ^{40}Ar - ^{39}Ar	217.6~230.7±5	薛春纪等, 2003
猫岭金矿	含绿泥石绢英岩	245.9	任仲元, 1990
老祚山金矿	磁黄铁矿和毒砂Rb-Sr	239±7	李晓敏等, 2001
香炉碗子金矿	石英闪长岩Rb-Sr	277±24	李长顺和姚汝江, 1997
白云金矿	黄铁矿Re-Os	225.3±7.0	本文

构造和区内岩浆活动,认为矿床形成于印支期,为与印支期岩浆活动有关的热液矿床;载金黄铁矿 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始加权平均值为 2.1 ± 2.8 (由于误差较大,仅具有参考价值),推测成矿物质主要来源于壳源。

(2) 白云金矿与区内印支期岩浆活动密切相关,成矿动力学背景可能为受蒙古-鄂霍次克大洋的向南北两侧俯冲影响的陆内后碰撞造山环境。

(3) 辽东裂谷区存在显著印支期成岩、成矿事件,今后在辽东裂谷区应重视与印支期有关的成矿和找矿研究。

致谢:野外样品采集工作得到了山东招金集团白云金矿李天明工程师的大力支持,中国地质大学(武汉)魏俊浩教授及另一位匿名审稿专家对本文提出了许多建设性的修改意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

白瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用. 北京:地质出版社:1-132.

陈锦荣,王玉华,高剑锋,万丛益. 1995. 辽东半岛金矿稳定同位素特征. 黄金地质, 1(4): 43-49.

陈文,万渝生,李华芹,张宗清,戴撞谟,施泽恩,孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. 地质学报, 85(11): 1917-1947.

段晓侠,刘建明,王永彬,周伶俐,李永贵,李斌,张壮,张作伦. 2011. 辽宁青城子铅锌矿多金属矿田晚三叠世岩浆岩年代学、地球化学及地质意义. 岩石学报, 28(2): 595-606.

关广岳,金成洙. 1983. 白云金矿床的成因. 地质与勘探, (10): 12-20.

国家辉,程德琳. 1993. 辽宁白云金矿床黄铁矿标型特征及其找矿意义. 贵金属地质, 2(2): 127-136.

蒋少涌,杨竟红,赵葵东,于际民. 2000. 金属矿床Re-Os同位素示踪与定年研究. 南京大学学报(自然科学版), 36(6): 669-677.

郎福全,陈贺,刘恒刚. 2007. 辽宁凤城白云金矿地质特征及找矿方向. 黄金, 28(11): 16-19.

李长顺,姚汝江. 1997. 吉林省香炉碗子金矿床矿化特征及成因机理探讨. 吉林地质, 16: 24-31.

李超,屈文俊,王登红,周利敏,陈郑辉,杜安道. 2012. Os同位素在花岗岩物质来源示踪中的初步研究:以湖南骑田岭岩体为例. 大地构造与成矿学, 36(3): 357-362.

李晓敏,魏存弟,周喜文. 2001. 老柞山金矿床成矿时代

研究. 地质找矿论丛, 16(2): 131-139.

刘国平,艾永富. 1999. 辽宁白云金矿某些基本问题探讨. 矿床地质, 18(3): 199-225.

刘国平,艾永富. 2000. 辽宁白云金矿成矿时代探讨. 岩石学报, 16(4): 627-632.

刘国平,艾永富. 2002. 辽宁小佟家堡子金矿床成矿时代探讨. 矿床地质, 21(3): 53-57.

毛景文,张光弟,杜安道,王义天,曾明国. 2001. 遵义黄家湾镍钼铂族元素矿床地质、地球化学和Re-Os同位素年龄测定——兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用. 地质学报, 75(2): 234-243.

毛景文,张作衡,于金杰,王义天,牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景:从金属矿床年龄精测得到的启示. 中国科学(D辑), 33(4): 289-299.

任纪舜,陈廷愈,牛宝贵,刘志刚,刘凤仁. 1992. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京:科学出版社:1-203.

任仲元. 1990. 辽宁省猫岭金矿床成因探讨. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 21: 11-21.

芮宗瑶,施林道,方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质. 北京:地质出版社:66-67.

石贵勇,孙晓明,潘伟坚,湖北铭,屈文俊,杜安道,李超. 2012. 云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿Re-Os定年及其地质意义. 科学通报, 57(26): 2492-2500.

涂光炽. 1984. 中国层控矿床地球化学(第一卷). 北京:科学出版社:137-138.

王富春. 2002. 辽宁白云金矿床的控矿构造特征. 黄金, 23(5): 4-7.

魏俊浩,刘丛强,李志德,赵永新. 2003. 论金矿床成矿年代学的确定——以丹东地区成岩成矿Rb-Sr、U-Pb同位素年代为例. 地质学报, 77(1): 113-119.

吴云辉,熊小林,赵太平,朱志敏,李立. 2013. 新疆东戈壁斑岩型Mo矿辉钼矿Re-Os年龄和成矿岩体锆石U-Pb年龄及其地质意义. 大地构造与成矿学, 37(4): 743-753.

薛春纪,陈毓川,路远发,李华芹. 2003. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义. 矿床地质, 22(2): 176-184.

杨新库. 2011. 对辽宁白云金矿床地质特征及深部找矿的新认识. 地质与资源, 20(2): 111-114.

叶柏舟,申永治,朱杰辰. 1986. 全国同位素地质年龄数据汇编(第四集). 北京:地质出版社:274-276.

翟安民,沈保丰,杨春亮,胡小蝶,曹秀兰,宫晓华. 2005. 辽吉古裂谷地质演化与成矿. 地质调查与究, 28(4):

213–220.

- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. *中国科学(D辑)*, 33(10): 913–929.
- 张宝华, 屈奋雄, 张鹏程, 刘如琦, 王富春, 郎全福, 吴润友, 王继孟. 1996. 论韧性剪切带对金矿的控制规律——以辽宁省白云金矿为例. *地质找矿论丛*, 11(1): 8–17.
- 赵鸿志, 杨沈生, 李辉. 2009. 白云金矿地质特征及成因研究. *有色矿冶*, 25(3): 4–7.
- 赵玉福, 杨宗恩. 1982. 辽宁省白云金矿床地质特征. *辽宁冶金地质*, (2): 44–62.
- 赵越, 崔盛芹, 郭涛, 徐刚. 2002. 北京西山侏罗纪盆地演化及其构造意义. *地质通报*, 21(4-5): 211–217.
- 赵芝, 陈郑辉, 王成辉, 杨武平. 2012. 闽东大湾钼铍矿的辉钼矿Re-Os同位素年龄——兼论福建省钼矿时空分布及构造背景. *大地构造与成矿学*, 36(3): 399–405.
- Arne D C, Bierlein F P, Morgan J W and Stein H J. 2001. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia. *Economic Geology*, 96: 1455–1459.
- Esser A E and Turekian K K. 1993. The osmium isotopic composition of the continental crust. *Geochimica et*

Cosmochimica Acta, 57: 3093–3104.

- Ming T Z, Lian C Z and Guang W. 2013. Zircon U-Pb and pyrite Re-Os age constraints on pyrite mineralization in the Yingjiagou deposit, China. *International Geology Review*, 55: 1616–1625.
- Saal A E, Rudnick R L and Ravizza G E. 1998. Re-Os isotopic evidence for the composition, formation and age of the lower continental crust. *Nature*, 393: 58–61.
- Shirey S B and Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 26: 423–500.
- Stein H J, Morgan J W and Schersten A. 2000. Re-Os dating of low-level highly adigenic (LLHR) sulfides: The Harnas gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. *Economic Geology*, 95: 1657–1671.
- Walker R J and Morgan J W. 1989. Rhenium Osmium isotope systematic of Carbonaceous Chondrites. *Science*, 243: 519–522.
- Yu G, Chen J F, Xue C J, Chen Y C, Chen F K and Du X Y. 2009. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi Pb-Zn-Ag-Au orefield, Northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 35: 367–382.

Re-Os Isotopic Dating and its Geological Implication of Gold Bearing Pyrite from the Baiyun Gold Deposit in Liaodong Rift

ZHANG Peng^{1,2}, LI Bin³, LI Jie⁴, CHAI Peng¹, WANG Xijin², SHA Deming² and SHI Jianmin²

(1. Collage of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110034, Liaoning, China; 3. Dandong Qingchengzi Mining Co. Ltd, Dandong 118107, Liaoning, China; 4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The Baiyun gold deposit is one of the most important large gold deposits in the Liaodong rift. However, no directly chronological dating result has been reported for it yet. On purpose of dating the mineralization of the deposit, rhenium and osmium isotopes in eight gold bearing pyrite separates from different types of ores in the deposit have been analyzed. The results yielded Re-Os isochronal age of 225.3 ± 7.0 Ma (MSWD=5.8), with an initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ rate of 2.1 ± 2.8 . Combined with the previous researches, it is concluded that the Baiyun gold deposit is a magmatic hydrothermal deposit, which was formed in the Indo-Sinian period and the ore-forming materials were mainly originated from the crust. It is also suggested that the deposit was formed in the intracontinental post-collisional setting subsequent to the subduction of the Mongolia-Okhotsk seas. This study may shed light on the future exploration of similar ore deposit (relate to the Indo-Sinian magmatism) in the Liaodong rift.

Keywords: Re-Os dating; gold bearing pyrite; deposit genesis; Baiyun gold deposit; Liaodong rift