



大兴安岭北部比利亚谷铅锌矿黄铁矿 Re-Os 同位素年龄及 He-Ar 同位素地球化学特征

马玉波¹⁾, 张勇¹⁾, 李立兴¹⁾, 邢树文²⁾, 张增杰¹⁾, 张彤³⁾, 肖克炎¹⁾, 王海坡⁴⁾, 范建福¹⁾

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) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

3) 内蒙古地质调查研究院, 内蒙古呼和浩特, 010020;

4) 内蒙古自治区第六地质矿产勘查开发院, 内蒙古海拉尔, 021008

内容提要:比利亚谷铅锌矿位于海拉尔-根河中生代火山盆地北西缘的得尔布干成矿带。该矿床赋存于上侏罗统满克头鄂博组酸性火山岩中, 受 NW 向断裂构造控制, 主矿体呈脉状产出。由于缺少适合传统放射性同位素定年的矿物, 其成矿时代未得到很好的限定, 制约了对矿床成因的认识。本文采用矿床中与矿石矿物密切共生的黄铁矿 Re-Os 同位素定年技术对比利亚谷铅锌矿的成矿时代进行研究。定年结果显示, 热液成因黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 133.4 ± 4.4 Ma, 与成矿带内其他铅锌矿成矿时间相似, 说明得尔布干成矿带内中生代铅锌银矿床基本形成于同一时代。比利亚谷矿床硫化物包裹体 He-Ar 同位素分析显示, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.02 \sim 2.37 \text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 $293.5 \sim 306$, 表明主成矿期多金属成矿流体主要为地壳流体和饱和大气水的混合, 但有少量幔源成分参与。比利亚谷矿床形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的碰撞后伸展环境, 得尔布干成矿带属于蒙古-鄂霍茨克成矿省的一部分。

关键词:比利亚谷铅锌矿; 黄铁矿 Re-Os 同位素定年; He-Ar 同位素; 成矿时代; 成矿物质来源

比利亚谷铅锌矿地处海拉尔-根河中生代火山盆地北西缘, 属得尔布干成矿带, 该成矿带与毗邻的俄罗斯赤塔州、阿穆尔州地区和蒙古乔巴山地区在中生代处于相似的地质构造背景, 应属同一个燕山期成矿省, 均具有较好的银、铅、锌、金、铜、铀矿的找矿潜力(朱群等, 2001; 赵京, 2014)。得尔布干成矿带是中国北部矿产资源战略性找矿评价的重要区带, 先后发现和评价了一批大中型银、铅、锌、铜、钼等矿床。成矿带内沿得尔布干断裂分布有得耳布尔、二道河子、下护林等铅锌矿床, 八大关、八八一等铜钼矿床及额仁陶勒盖银矿床等, 断裂北西侧发育乌山、甲乌拉、查干布勒根等大型有色金属矿床(余宏全等, 2009; 赵一鸣等, 2004; 毛景文等, 2013; 马玉波等, 2016)。比利亚谷铅锌矿是近年来新发现的矿

床, 已达到中型规模, 且深部具有较好的找矿远景, 但由于发现时间晚, 理论研究非常有限。初步研究认为比利亚谷铅锌矿发育于得尔布干深大断裂的上盘, 与得耳布尔和二道河子铅锌矿同处于下护林-西吉诺成矿带, 具有中低温热液充填型矿床的特征(柳立群等, 2012), 地球化学分析显示赋矿火山岩产于板内, 与其有关的岩浆可能来源于上地幔, 并混染了壳源物质, 而主成矿期则主要受大规模岩浆活动影响(吴涛涛等, 2014; 马玉波等, 2015)、成矿流体属于不均匀流体, 流体混合作用是重要的成矿机制(段明新等, 2014), 而系统的成矿物理化学条件、矿床成因机制、成矿物质来源等研究尚未开展。随着硫化物 Re-Os 同位素定年技术的不断进步(丰成友等, 2006; 杜安道等, 2009; 李超等, 2009), 为精确厘定其

注: 本文为国家重点研发计划项目(编号 2017YFC0601303)、国家自然科学基金项目(编号 41202042)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(编号 KK2124、K1211)联合资助的成果。

收稿日期: 2021-01-23; 改回日期: 2021-06-34; 网络发表日期: 2021-10-29; 责任编辑: 毕献武; 责任编辑: 李曼、蔡志慧。

作者简介: 马玉波, 男, 1981 年生。副研究员, 主要从事矿床地质和成矿区划研究。E-mail: mayb@cags.ac.cn。

引用本文: 马玉波, 张勇, 李立兴, 邢树文, 张增杰, 张彤, 肖克炎, 王海坡, 范建福. 2022. 大兴安岭北部比利亚谷铅锌矿黄铁矿 Re-Os 同位素年龄及 He-Ar 同位素地球化学特征. 地质学报, 96(4): 1265~1278, doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022203.
Ma Yubo, Zhang Yong, Li Lixing, Xing Shuwen, Zhang Zengjie, Zhang Tong, Xiao Keyan, Wang Haipo, Fan Jianfu. 2022. Re-Os isotope age of pyrite and He-Ar isotope of sulfides from the Biliyagu Pb-Zn deposit in the northern Great Xing'an Range. Acta Geologica Sinica, 96(4): 1265~1278.

成矿时代,研究其成因机制提供了条件。为此,在野外地质调查的基础上,开展比利亚谷铅锌矿中与闪锌矿密切共生的黄铁矿 Re-Os 同位素定年研究,并结合闪锌矿 He-Ar 同位素分析,进一步约束成矿时代,判定成矿物质来源,确定其成矿构造背景。

1 区域地质概况

比利亚谷铅锌矿位于 NE 向的得尔布干深大断裂北西侧(图 1a),夹于额尔古纳地块和鄂伦春晚古生代中期增生带之间(图 1)。前中生代受古亚洲洋构造演化影响,中生代以来受北部鄂霍茨克洋闭合和太平洋活动陆缘的联合作用,区内构造-岩浆活动强烈,并形成海拉尔-根河火山断陷盆地(Meng, 2003;张兴洲等,2006;钱程等,2018)。

区域内出露地层主要为:中侏罗系统塔木兰沟组英安岩夹角砾凝灰岩和上侏罗统满克头鄂博组安山岩及第四系残坡积和冲洪积物。① 中侏罗统塔木兰沟组岩性主要为英安岩、角砾凝灰岩。其中英安岩呈灰绿色,细粒—隐晶结构,块状构造,组成矿物成分主要为长英质,岩石多碳酸盐化、硅化、黄铁矿化、绢云母化及次生的褐铁矿化。角砾凝灰岩呈绿色,凝灰角砾结构,块状构造,角砾成分为凝灰质,呈半棱角状-棱角状,具绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、硅化。② 上侏罗统满克头鄂博组岩性主要为安山岩。岩石灰褐色,细粒-隐晶结构,局部斑状结构,块状构造,基质为隐晶质,岩石多青磐岩化^①。

区内 NE 向得尔布干断裂和 NNE 向吉尔布干断裂是规模最大的断裂,两条断裂及其旁侧的 NW, NNW 断裂构成区域构造格架,比利亚谷位于得尔布干断裂的北西侧,中生代受该断裂多次继承性构造活动影响,首先使岩石产生形变后发生弯曲,形成轴向 NE—SW 向,较为开阔的上比利亚谷背斜。其后进一步的构造运动使得拱曲的岩石发生断裂并产生位移,形成上比利亚平移断层,中生代晚期构造运动再次复活,使得该断裂的 SW 盘下降 NE 上升,演化为逆断层,使隐伏于满克头鄂博组之下的塔木兰沟组地层出露地表。

2 矿床地质特征

比利亚谷银铅锌矿床的矿体严格受得尔布干深大断裂派生的次一级 NW 向张性、压扭性断裂带(F35~F37)和裂隙带控制,它既是矿床的控矿构造,也提供了容矿空间。带内的容矿断裂空间上大

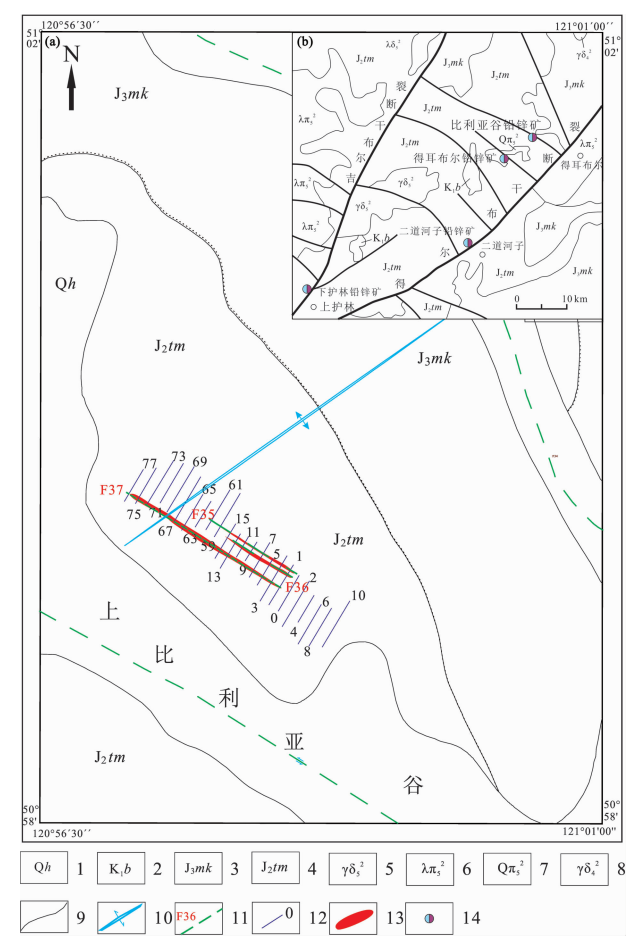


图 1 比利亚谷铅锌矿大地构造地质简图 (a, 据吴涛涛等, 2014) 及位置图 (b)^①

Fig. 1 Geological sketch map (a, after Wu Taotao et al., 2014) and tectonic location (b)^① of the Biliyagu Pb-Zn deposit

1—第四系; 2—下白垩统白云老高组; 3—上侏罗统满克头鄂博组; 4—中侏罗统塔木兰沟组; 5—燕山早期花岗岩闪长岩; 6—燕山早期流纹斑岩; 7—燕山早期石英斑岩; 8—海西期花岗岩闪长岩; 9—地质界线; 10—背斜构造; 11—断层位置及编号; 12—勘探线位置及编号; 13—矿体; 14—铅锌矿床

1—Quaternary; 2—Baiyinlaogao Formation in K₁; 3—Manketouebo Formation in J₃; 4—Tamulangou Formation in J₂; 5—Granodiorite in early Yanshanian; 6—Rhyolite porphyry; 7—Quartz porphyry in early Yanshanian; 8—Granodiorit in Hercynian period; 9—geological boundary; 10—anticline; 11—location and serial number of fault; 12—location and serial number of exploration lines; 13—ore body; 14—Pb-Zn deposit

致呈斜列式、雁行式分布,倾向 NE 或 SW(图 1)。断裂在走向和倾向上呈舒缓波状,常见分支复合、尖灭再现和追索叠加等现象。带内构造角砾岩、糜棱岩和断层泥较发育。

比利亚谷银铅锌矿床的矿体主要赋存于中侏罗统塔木兰沟组角闪安山岩、安山质火山碎屑岩中。矿体整体走向 295°~305°,沿走向延长在 53~1550

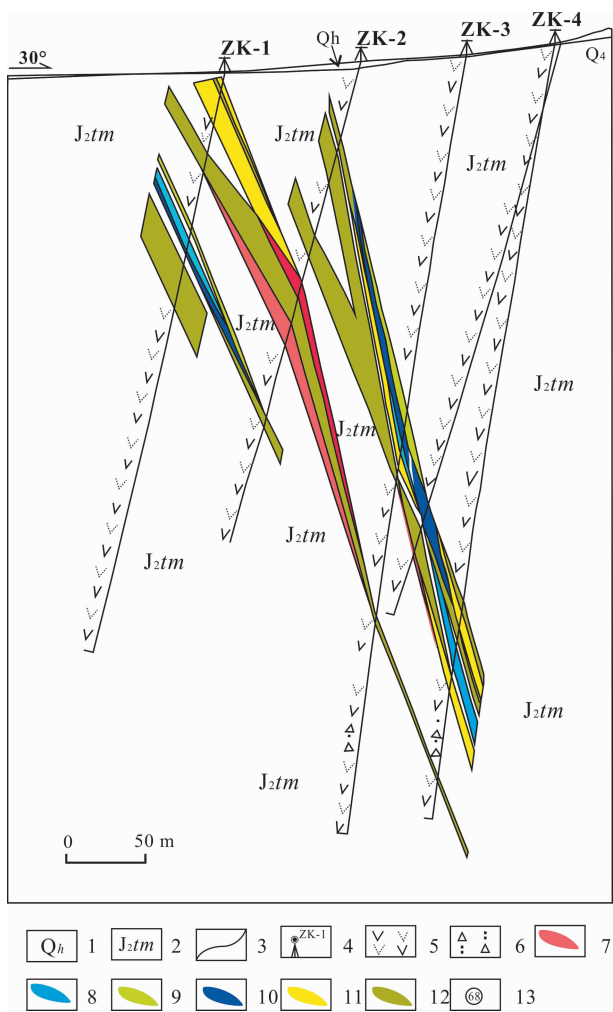


图 2 比利亚谷矿区铅锌银矿 0 勘探线地质剖面图
(据资料^①修改)

Fig. 2 Geological profile of the prospecting line 0 of the Biliyagu Pb-Zn deposit(modified after reference^①)

1—第四系:坡积、河流冲积物;2—中侏罗统塔木兰沟组角砾凝灰岩及英安岩;3—地质界线;4—钻孔位置及编号;5—英安岩;6—角砾凝灰岩;7—铅矿体;8—低品位铅矿体;9—低品位铅锌矿体;10—锌矿体;11—低品位锌矿体;12—铅锌矿体;13—矿体编号
1—Quaternary: deluvium, river alluvium; 2—Tamulangou Formation of Middle Jurassic: tuff breccia and dacite; 3—geological boundary; 4—drill location and serial number; 5—dacite; 6—tuff breccia; 7—Pb ore body; 8—low-grade Pb ore body; 9—low-grade Pb-Zn ore body; 10—Zn ore body; 11—low-grade Zn ore body; 12—Pb-Zn ore body; 13—number of ore body

m 之间,延深在 280~600 m 之间,厚度在 4.54~14.65 m 之间,倾角在 65°~70°之间,在 1 号勘探线以西倾向 SW,以东则倾向 NE。矿体多呈脉状、透镜体状产出,各矿体在走向和延深上厚度变化较稳定,矿化较均匀,局部有膨缩及分支现象(图 2)。依据化学分析结果共圈出 110 条银铅锌矿(化)体,其中 17 条为工业矿体,主矿体 7 条。该矿床 Pb 平均

品位 2.06%,Zn 平均品位 2.35%,Ag 在矿体中平均品位 25.24 g/t。工业矿体品位 Pb 变化于 0.73%~3.89%之间,Zn 在 1.05%~3.76%之间,Pb+Zn 金属资源/储量超过 70 万 t^①(马玉波等,2015)。

矿石结构主要有半自形结构、他形晶结构、交代结构、包含结构和乳浊状结构。矿石构造主要有块状构造、斑杂状构造、细脉状构造、浸染状构造等(图 3)。主要金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿,其次为黄铜矿、辉银矿、磁铁矿、褐铁矿和铜蓝等,脉石矿物主要有石英、绿泥石、绿帘石和磷灰石等(图 4)。块状矿石主要由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和少量的石英组成,矿石中常见后期石英脉(图 3a、d)。斑杂状矿石中除主要矿物为闪锌矿和方铅矿外,还含有较多的绿泥石以及少量的绿帘石(图 3b)。细脉状矿石主要由方铅矿和闪锌矿组成,其分布主要受石英脉控制,位于石英脉边部,而距离石英脉较远的地方为火山岩围岩(图 3c)。浸染状矿石由闪锌矿及少量方铅矿组成,呈浸染状分布,矿物呈他形细粒结构(图 3e)。整体上看,在比利亚谷铅锌矿矿石中发育有粗细不等的石英脉,且与主要矿石矿物具有较强的对应关系,显示典型热液矿床的特征。

矿区的围岩蚀变分为面型和线型两种,面型多为青磐岩化,集中分布于矿区中的角砾凝灰岩、英安岩中,岩石多表现为细粒的钠长石化和绿帘石化,此带走向 280°左右,蚀变带宽度 3~5 km;线型蚀变主要分布于后期热液充填的张性节理裂隙及附近围岩中,成组、成群出现,多使裂隙两盘围岩产生硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化、方铅矿化、闪锌矿化、黄铜矿化,蚀变带宽约 2.8 km。其中,硅化和黄铁矿化与成矿关系密切,由矿体向外其强度逐渐减弱。

根据脉体穿插关系、矿石组构和矿物组合及围岩蚀变特征,比利亚谷铅锌矿成矿过程分为 3 个阶段:① 石英-铁氧化物阶段,矿物组合为石英、斜长石、赤铁矿、磁铁矿和少量黄铁矿等,金属矿物主要呈半自形—他形浸染状分布;② 石英-多金属硫化物阶段,为主成矿阶段,矿物组合为石英、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿,硫化物主要呈浸染状和脉状分布;③ 石英-碳酸盐阶段,主要形成方解石细脉、石英细脉及少量黄铜矿。本次采集的样品为石英-多金属硫化物阶段的矿石。

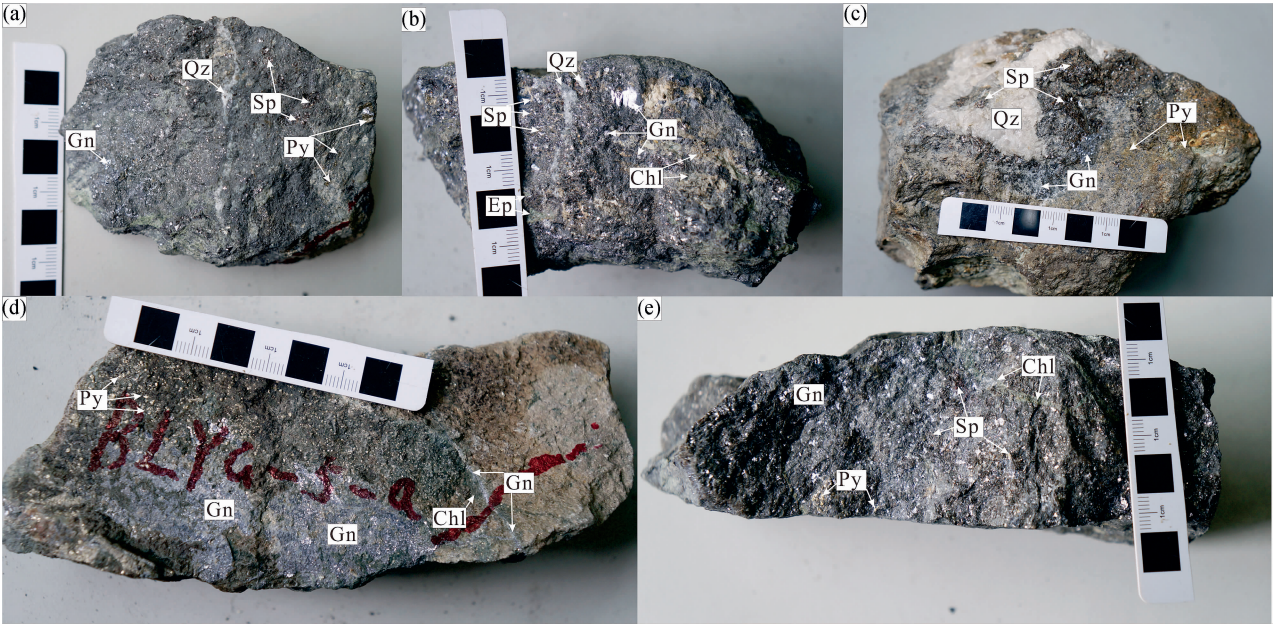


图 3 比利亚谷铅锌矿床典型矿石照片

Fig. 3 Photographs of typical ore from the Biliyagu Pb-Zn deposit

(a) 方铅矿-闪锌矿块状矿石; (b) 闪锌矿-方铅矿-绿泥石斑杂状矿石; (c) 闪锌矿-方铅矿-石英脉状矿石; (d) 黄铁矿-方铅矿块状矿石; (e) 闪锌矿-方铅矿-黄铁矿浸染状矿石; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿; Qz—石英; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Cv—铜蓝
(a)—Galena-shpalerite massive ore; (b)—shpalerite-galena-chlorite taxitic ore; (c)—shpalerite-galena-quartz veined ore; (d)—pyrite-galena massive ore; (e)—sphalerite-galena-pyrite disseminated ore; Gn—galena; Sp—sphalerite; Py—pyrite; Qz—quartz; Chl—chlorite; Ep—epidote; Cv—covellite

3 分析方法与结果

3.1 黄铁矿 Re-Os 同位素定年及结果

本次用于 Re-Os 同位素年龄测定的 6 件黄铁矿样品均采自比利亚谷矿区坑道内。样品的选择基于详细的岩芯观察以及岩石薄片显微结构鉴定。样品均为稠密浸染状矿石,发育半自形—他形粒状结构、粒间充填交代结构、裂隙充填交代结构等,金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和少量黄铜矿,脉石矿物主要为石英、绢云母等(图 3e,4d~f)。样品经人工粉碎后,按重力和磁选方法分选出黄铁矿,最后在双目镜下挑选(纯度>99%)。

黄铁矿 Re-Os 同位素组成分析工作由国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,具体的原理和详细分析方法参见杜安道等(2009),李超等(2009)。采用卡洛斯管溶样,通过蒸馏分离 Os,用丙酮萃取并纯化 Re。样品 Re、Os 的含量及同位素组成采用 Finnigan Element 2 型高分辨电感耦合等离子质谱(HR ICP MS)完成。测定过程中通过监测¹⁸⁵Re 控制 Re 对 Os 测定的干扰,通过监测¹⁹⁰Os 控制 Os 对 Re 测定的干扰。分析质量采用国家标准物质 GBW04435(HLP)和 GBW04436(JDC)进行

监测,整个实验流程空白为 Re<4 pg,Os<0.7 pg。

本次测定的 6 件黄铁矿样品 Re-Os 同位素组成列于表 1,其中普通 Os 是根据 Nier 值校正得出 Os 同位素丰度,借助¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量值计算得出的,¹⁸⁷Os 为放射成因¹⁸⁷Os 和初始¹⁸⁷Os 之和。Re-Os 含量的不确定度,是由样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测定的分馏校正误差和待分析样品同位素比值测量误差经计算得出;而模式年龄的不确定度计算还包括衰变常数的不确定度(1.02%)。Re-Os 同位素模式年龄 t 的计算公式如下:

$$t = [\ln(1 + {}^{187}\text{Os}/{}^{187}\text{Re})]/\lambda$$

式中,Re 衰变常数 λ 采用 1.666×10⁻¹¹ a⁻¹ (Smoliar et al., 1996)。

Re-Os 同位素分析全流程空白 Re 为 2 pg,Os 为 0.1 pg,表 1 数据已经扣除了本底对样品的影响。

从比利亚谷铅锌矿床中黄铁矿 Re-Os 同位素数据可以看出,黄铁矿的 Re 含量为 48.6×10⁻¹²~1737×10⁻¹²,¹⁸⁷Os 含量为 0.10×10⁻¹²~25×10⁻¹²。采用 Isoplot 软件(Ludwig, 1999)对比利亚谷铅锌矿床黄铁矿 Re-Os 同位素数据进行回归计算和投图,获得 6 件硫化物 Re-Os 等时线年龄为

133.4±4.4 Ma(MSWD=26,n=6)(图 5)。上述同位素年龄揭示比利亚谷铅锌矿的成矿时代为早白垩世。

本次实验结果的误差偏大,其原因通常涉及以下几个方面:① 方法本身的原因,即黄铁矿 Re-Os 同位素分析的复杂性和不确定性而所致;② 样品自身的原因,如黄铁矿裂隙中的充填物或包体矿物可

导致黄铁矿样品的纯度不足而引起误差(唐永永等, 2013;Zhai et al. , 2019);③ 黄铁矿中 Re-Os 的含量太低,Re 有一半小于 0.1 ng/g,可能受到后期流体改造的影响(李超等,2010; Lyu et al. , 2020)。但从 MSWD 值及拟合概率来看,其等时线年龄是可靠的,对于开展矿床形成时代的研究仍具有重要意义。

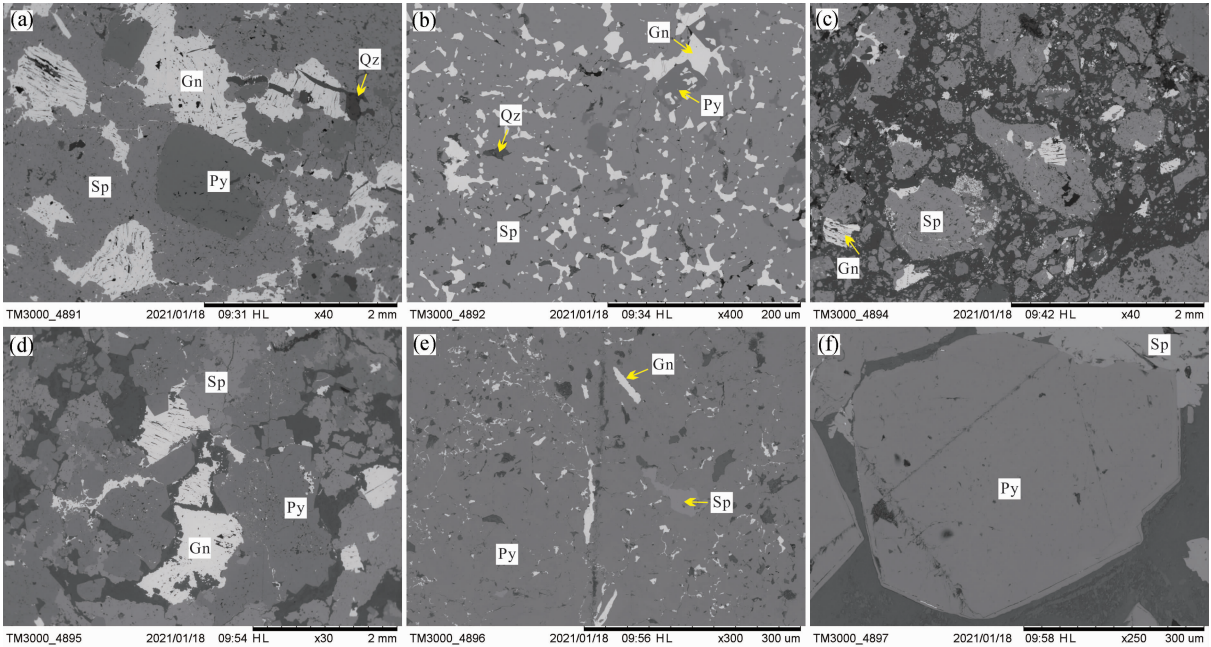


图 4 比利亚谷铅锌矿床典型矿石镜下照片(背散射)

Fig. 4 Photomicrographs of typical ore from the Biliyagu Pb-Zn deposit (BSE images)

(a)一块状铅锌矿石主要由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和少量石英组成;(b)一块状铅锌矿石的闪锌矿中可见大量的方铅矿包体,有时含少量黄铁矿和石英;(c)一斑杂状铅锌矿石中的矿石矿物为闪锌矿和方铅矿;(d)一稠密浸染状铅锌矿石主要由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和石英组成;(e)一稠密浸染状铅锌矿石的黄铁矿中常发育矿物包体,成分为方铅矿、闪锌矿和石英;(f)一稠密浸染状铅锌矿石的黄铁矿有时较为纯净,内部不发育矿物包体;Gn—方铅矿;Sp—闪锌矿;Py—黄铁矿;Qz—石英

(a)—Massive ore composed of galena, sphalerite, pyrite and minor quartz; (b)—abundant galena-pyrite-quartz mineral inclusions hosted in sphalerite of massive ore; (c)—taxitic ore dominated by sphalerite and galena; (d)—densely disseminated ore composed of galena, sphalerite, pyrite and quartz; (e)—abundant galena-sphalerite-quartz mineral inclusions hosted in pyrite of densely disseminated ore; (f)—a small number of pyrite grains of densely disseminated ore without mineral inclusion;Gn—galena;Sp—sphalerite; Py—pyrite; Qz—quartz

表 1 比利亚谷铅锌矿矿石黄铁矿 Re-Os 同位素数据

Table 1 Re-Os dating data of pyrite in ore body from the Biliyagu Pb-Zn deposit

样品编号	样品类型	样品重量(g)	Re(ng/g)		普 Os(ng/g)		Re ¹⁸⁷ (ng/g)		Os ¹⁸⁷ (ng/g)		¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os		¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
BLYG-3-a	黄铁矿型矿石	0.70091	0.0486	0.0002	0.0012	0.0000	0.0305	0.0001	0.0001	0.0000	201.8	2.1	0.7321	0.0025
BLYG-3-b	黄铁矿型矿石	0.70108	1.737	0.005	0.0020	0.0000	1.097	0.003	0.0025	0.0000	4209	43	9.638	0.030
BLYG-3-d	黄铁矿型矿石	0.70677	0.0776	0.0002	0.0013	0.0000	0.0488	0.0002	0.0002	0.0000	282.6	2.9	0.9939	0.0056
BLYG-3-f	黄铁矿型矿石	0.70031	0.0790	0.0002	0.0013	0.0000	0.0498	0.0002	0.0002	0.0000	295.7	3.0	0.9442	0.0025
BLYG-4-b	强烈蚀变型矿石	0.70185	0.2163	0.0006	0.0021	0.0000	0.1359	0.0004	0.0004	0.0000	496.2	5.0	1.496	0.004
BLYG-5-c	浸染状矿石	0.69992	0.8941	0.0026	0.0021	0.0000	0.5620	0.0016	0.0014	0.0000	1995	21	4.824	0.042

3.2 矿物 He-Ar 同位素测定及结果

He-Ar 同位素组成分析由自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。系统由压碎、纯化

和质谱系统组成。法拉第杯分辨率>400,离子计数器分辨率>700,可将³He 与⁴He、HD+H₃与³He 峰完全分开。主要流程如下:将高纯度 40~60 目样品

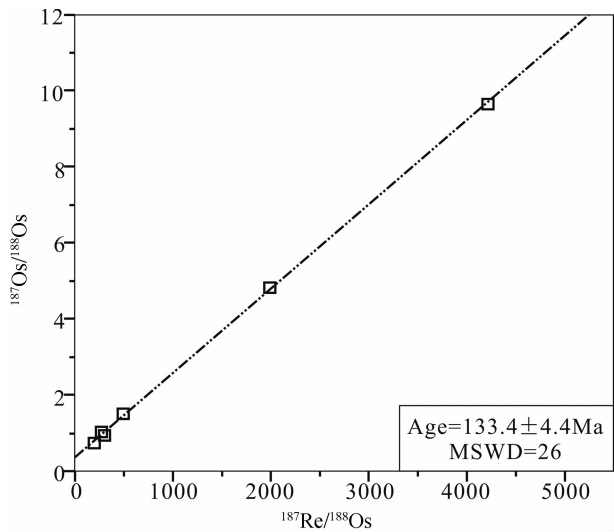


图 5 比利亚谷铅锌矿黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄
Fig. 5 Re-Os isochron ages of pyrite from the Biliyagu Pb-Zn deposit

清洗、烘干,取 0.5~1.0 g 装入不锈钢坩埚再移到压碎装置中,密封并加热去气、抽真空。压碎样品,多级纯化包裹体气,分离出纯 He 和 Ar。He 测试:He 模式下,⁴He 信号用法拉第杯接收,³He 用离子倍增器接收。离子源电压 4.5kv,电流 1218 μA,trap 电压 15.56 V,电流 450 μA。Ar 测试:Ar 模式下,⁴⁰Ar 和³⁶Ar 用法拉第杯接收,³⁸Ar 用倍增器接收。离子源电压 4.5 kV,电流 454 μA,trap 电压 15.02 V,电流 200 μA。同位素比值结果校正:利用当天空气标准的测试结果和空气标准值校正样品测试结果。空气的³He/⁴He 标准值采用 1.4×10⁻⁶,⁴⁰Ar/³⁶Ar 和³⁶Ar/³⁸Ar 标准值采用 295.5 和 5.35。⁴He 和⁴⁰Ar 含量(cm³SPT/g)结果。利用 0.1 mL 标准气⁴He(52.3×10⁻⁸ cm³ SPT)和⁴⁰Ar(4.472×10⁻⁸ cm³ SPT)含量、标准气和样品的同位素信号强度以及样品压碎后过筛 100 目以下的质量标定样品中⁴He 和⁴⁰Ar 含量。

本次 He、Ar 同位素组成的分析结果见表 2。比利亚谷矿床硫化物的⁴He 含量介于(0.19~6.56)×10⁻⁷ cm³·STP/g 之间,³He 含量介于(9.49~60.38)×10⁻¹⁴ cm³·STP/g 之间,³He/⁴He 值介于(0.19~28.05)×10⁻⁷ 之间。硫化物的⁴⁰Ar 含量介于(2.02~5.02)×10⁻⁷ cm³·STP/g,⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 293.5~306。黄铁矿、闪锌矿是研究区多金属矿中最主要的矿石矿物,黄铁矿和闪锌矿为主成矿阶段最主要的硫化物矿物,其流体包裹体可以在最大程度上反映成矿期成矿流体的原始信息。研究表

明,与黄铁矿具有很低的 He 扩散系数相比,流体包裹体中的 He 在扩散丢失过程中,不会产生明显的 He 同位素分馏,对其³He/⁴He 比值一般影响不大(Jean-Baptiste et al., 1996)。理论上讲,由于样品保存完好,同时寄主矿物晶格中由放射性元素衰变产生的子体难以进入包裹体,由 Th 和 U 放射性衰变形成的⁴He 可以忽略不计,另外还可以通过 Ra 与⁴He 相关图解来判断。由图 6a 可以看出,R/Ra-⁴He 几乎呈线性相关,这表明不同矿脉不同矿物形成于同一成矿流体,且矿物结晶之后没有后期流体叠加改造。因此,其成矿阶段形成的矿物中的流体包裹体测定值基本上可以代表闪锌矿、方铅矿、黄铁矿形成时流体的初始同位素值。

4 讨论

4.1 成矿时代

得尔布干成矿带主要发育斑岩型铜钼矿床、热液脉型和矽卡岩型铅锌银矿床及浅成低温热液型金银矿床(武广等,2010)。前人在该地区开展了大量成岩成矿年代学研究工作,建立了区域成岩年代学格架(表 3)。本次获得的比利亚谷铅锌矿床黄铁矿 Re-Os 同位素年龄 133.4±4.4 Ma 代表矿床的成矿时代为早白垩世早期,与区内具有相似成因的查干布拉根铅锌银矿、甲乌拉银铅锌矿具有一致的成矿时代。

上述成岩成矿年代学研究结果表明,得尔布干成矿带及其向蒙古和俄罗斯延伸的区域上成岩成矿时代主要集中于侏罗纪与白垩纪,其中斑岩型铜钼矿床形成于晚三叠世—早侏罗世,热液脉型和矽卡岩型铅锌银矿床及浅成低温热液型金银矿床主要形成于中晚侏罗世—早白垩世早期,成矿时限与中国东部中生代大规模金属成矿作用时限基本一致。

4.2 成矿物质来源

矿物内的 He 和 Ar 主要有 3 种赋存状态:①圈闭在流体包裹体中(Burnard et al., 1999);②矿物晶格中由 U+Th 和 K 衰变而产生的后生放射成因的⁴He 和⁴⁰Ar(Kendrick et al., 2013a);③矿物表面吸附的 He 和 Ar。由于流体包裹体对 Ar 有很好的保存能力,Ar 在漫长的地质历史时期也可以定量地保存下来,用压碎样品来提取稀有气体,矿物晶格内放射成因的 He 和 Ar 并未释放出来,即仅释放样品包裹体中的 He 同位素,因此包裹体内的 He、Ar 同位素组成可用来研究流体形成和迁移的规律(Stuart et al., 1994,1995; Qiu, 1996)。

表 2 比利亚谷铅锌矿矿石矿物的 He、Ar 同位素组成

Table 2 Helium and argon isotopic composition of ore minerals from the Biliyagu Pb-Zn deposit

样号	矿物	³ He 含量	⁴ He 含量	³ He/ ⁴ He	⁴⁰ Ar 含量	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁶ Ar/ ³⁸ Ar	He 总 含量	Ar 总 含量	⁴⁰ Ar*	⁴⁰ Ar	F ⁴ He	⁴⁰ Ar* 含量	R/Ra
		(×10 ⁻¹⁴)	(×10 ⁻⁷)	(×10 ⁻⁷)	(×10 ⁻⁷)			(×10 ⁻⁷)	(×10 ⁻⁷)	比例(%)	(×10 ⁻⁷)	(×10 ³)	(×10 ⁻⁷)	
BLYG-2-c	闪锌矿	12.33	6.56	0.19	2.02	302.4	5.33	6.56	2.03	2.12	2.02	5.89	4.30	0.02
BLYG-2-e	黄铁矿	41.03	2.19	1.87	3.87	298.3	5.35	2.19	3.88	0.76	3.87	1.02	2.95	0.16
BLYG-4-a	黄铁矿	60.38	0.21	28.62	3.83	298.9	5.34	0.21	3.84	0.96	3.83	0.10	3.70	2.37
BLYG-4-b	闪锌矿	20.51	1.20	1.71	5.00	306.0	5.36	1.20	5.02	3.28	5.00	0.44	16.48	0.14
BLYG-4-d	黄铁矿	9.49	0.47	2.00	5.02	293.5	5.37	0.47	5.04	-	5.02	0.17	-	0.17
BLYG-4-a	黄铁矿	53.95	0.19	28.05	4.11	301.6	5.35	0.19	4.12	1.87	4.11	0.08	7.70	2.32

注：³He、⁴He、He、Ar、⁴⁰Ar、⁴⁰Ar*、³⁶Ar 等含量单位为 cm³ STP/g，比值均为原子数之比，以当地空气为标样，标样测试值：³⁸Ar/³⁶Ar=0.1864，⁴⁰Ar/³⁶Ar=308，³He/⁴He=1.207×10⁻⁶；样品经过标准样品校正，误差为 1δ 误差值，浓度误差均小于 10%；压碎重量为小于 100 目的样品重量；Ra 为空气的³He/⁴He 值；R=³He/⁴He；F⁴He=(⁴He/³⁶Ar)样品/(⁴He/³⁶Ar)大气；(⁴He/³⁶Ar)大气=0.1655。

表 3 得尔布干成矿带重要矿床成岩成矿年龄

Table 3 The rock-forming and ore-forming ages of the main deposits in the Derbugan metallogenic belt

矿床	测试对象	测试方法	成岩成矿年代(Ma)	参考文献
八大关铜钼矿	石英闪长玢岩	锆石 U-Pb	229	陈志广,2010
太平川铜钼矿	辉钼矿	Re-Os	203	陈志广等,2010
太平川铜钼矿	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	202	陈志广等,2010
乌奴格吐山铜钼矿	二长花岗斑岩	全岩 Rb-Sr	183.9	秦克章等,1999
乌奴格吐山铜钼矿	二长花岗斑岩	绢云母 K-Ar	183.5	秦克章等,1999
乌奴格吐山铜钼矿	二长花岗斑岩	锆石 U-Pb	183.3	秦克章等,1999
乌奴格吐山铜钼矿	辉钼矿	Re-Os	177.6	Chen et al., 2011
八大关铜钼矿	石英闪长岩	全岩 K-Ar	166~143	赵一鸣等,1997
二道河子铅锌矿	塔木兰沟组凝灰岩	锆石 U-Pb	164	李进文等,2011
蒙古的乌兰铅锌银矿	青磐岩	K-Ar	161	张炯飞等,2001
比利亚谷铅锌矿	流纹质火山角砾熔岩	锆石 U-Pb	159	吴涛涛等,2014
俄罗斯萨赫塔明铜钼矿	花岗斑岩	Rb-Sr	150~145	张炯飞等,2001
俄罗斯达拉松金矿	青磐岩	K-Ar	150	张炯飞等,2001
俄罗斯达拉松金矿	黄铁绢英岩	K-Ar	145	张炯飞等,2001
甲乌拉银铅锌矿	闪锌矿	Rb-Sr	143	李铁刚等,2014
甲乌拉银铅锌矿	黄铁矿	Rb-Sr	142	李铁刚等,2014
得耳布尔铅锌银矿	塔木兰沟组火山岩	锆石 U-Pb	141.6	明珠等,2015
查干布拉根铅锌银矿	绢云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	138	Li et al., 2016
乌努格吐山铜钼矿	含矿斑岩	全岩 K-Ar	138	赵一鸣等,1997
甲乌拉铅锌银矿床	二长斑岩	全岩 K-Ar	133~110	赵一鸣等,1997
东郡铅锌银矿	闪锌矿	Rb-Sr	130	杨郦城等,2015
二道河子铅锌矿	黄铁矿	Rb-Sr	130	徐智涛,2020
俄罗斯巴列依金矿	冰长石	K-Ar	120~112	张炯飞等,2001
额仁陶勒盖银矿	石英斑岩	Rb-Sr	120	赵一鸣等,1997
二道河子铅锌矿	流纹斑岩	Rb-Sr	111	张炯飞等,2001

地质流体的 He、Ar 同位素组成不仅与流体源区相关,还与所经历的地质演化过程有关,因此地质流体的³He/⁴He、⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值可以用来指示流体源区、水-岩反应的程度和温度、流体在含水岩层中滞留的时间以及有机组分的参与等(Kendrick et al., 2013b;段超等,2016;武丽艳,2019)。热液流体中的 He 和 Ar 等稀有气体主要存在 3 种来源,即大气饱和水(ASW)、深源地幔流体、地壳流体,其中地壳来源流体³He/⁴He 比值在 0.01~0.05 Ra 之间(Stuart et al., 1995),地幔来源³He/⁴He 比值在 6

~9 Ra 之间(Burnard et al., 1999)。

比利亚谷铅锌矿多金属矿化³He/⁴He 比值变化范围较大,为 0.02~2.37 Ra,平均 0.86 Ra,整体介于地幔与地壳之间(图 6b),略高于与地壳放射成因的³He/⁴He 特征值(0.01~0.05 Ra)和壳源岩浆流体提供的 He 同位素组成(³He/⁴He≤0.1 Ra(Staurt et al., 1994)。综合分析认为,主成矿阶段的流体以大气成因流体为主(图 6d),存在其他性质的流体来源,也反映了其可能受到了成矿过程中强烈的蚀变作用而产生了围岩反应。导致³He/⁴He

值升高的可能性有四种:一是幔源 ^3He 的加入;二是富含Li元素的地壳岩石矿物的存在或成矿流体富含Li元素;三是饱和大气降水的混入;四是宇宙射线成因的 ^3He 的加入。前期对该矿床流体包裹体的研究显示其主成矿阶段发生了流体混合作用,而比利亚谷的成矿深度为0.24~0.78 km(段明新等, 2014),受宇宙射线成因 ^3He 的影响可以忽略,因此流体包裹体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值高于正常地壳值的现象应该是饱和大气降水混入和流体混合共同作用的结果。

比利亚谷铅锌矿区内发育NE向得尔布干断裂和NNE向吉尔布干断裂,两条断裂及其旁侧的NW,NNW向断裂构成区域构造格架。大规模的深断裂以及次生断裂,可能成为幔源组分进入浅部的通道。因此,在120 Ma发生的区域岩石圈快速减薄引起的岩浆活动,产生了一期深变质作用以及壳幔相互作用有关的深部流体可能会将少量幔源组分带入到成矿流体体系,导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值升高。地幔流体的 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值为0.33~0.56,地壳的平均值为0.156(Dunai et al., 1995; Stuart et al., 1995; 李晓峰等, 2004; 田世洪等, 2006; 丰成友等, 2006),而比利亚谷铅锌矿多金属矿化的 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值为0.3~21.6,平均9.46,说明可能有一定程度的地幔流体参与了成矿(马玉波等, 2015)。

但是,与中国胶东金青顶金矿床($^3\text{He}/^4\text{He}=0.1\sim2.2\text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=462.7\sim1507.5$;张运强等, 2012)、万古金矿床($^3\text{He}/^4\text{He}=3\sim7.2\text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=573\sim7744$;Mao et al., 2002)、湘南新田岭白钨矿床($^3\text{He}/^4\text{He}=4.08\text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=452$;蔡明海等, 2008)、窑岭—梅子窝钨矿床($^3\text{He}/^4\text{He}=0.0043\sim4.62\text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=330\sim2952$; Zhai et al., 2012)、哀牢山金矿床($^3\text{He}/^4\text{He}=0.2\sim1.42\text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=328.83\sim9114.44$;胡瑞忠等, 1999)等确定有幔源流体参与成矿的热液矿床相比,比利亚谷铅锌矿样品中所有测试数据的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值整体低于饱和大气水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(1 Ra),同时Ar同位素特征($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=293.5\sim306$)与上述矿床也存在较大差异。因此,认为比利亚谷铅锌多金属矿化的成矿流体中可能有少量幔源成分参与,但不起主要作用。而地壳岩石中宇宙射线成因的 ^3He 主要产生在地表1.5 m的范围内(Lal, 1987; Simmons et al., 1987; Burnard et al., 1999),本次测试样品均采自深部坑道,因此宇宙射线成因的 ^3He 对成矿流体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的影响可以忽略。

$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^3\text{He}/^4\text{He}$ 图解上(图6c、d),黄铁矿和闪锌矿流体包裹体的投点相对较为分散,主要集中于地壳端元与地幔端元之间,但主要以饱和大气水为主,部分样品接近幔源,显示其可能受到了岩浆热液的参与,这可能是受到了区域上岩浆作用的影响(吴涛涛等, 2014)。多金属矿化流体虽然在地幔和地壳流体之间变化较大,但无明显的地幔-地壳二端元混合趋势,该特征暗示比利亚谷铅锌矿主成矿期多金属矿化流体主要为饱和大气水成因,受到少量岩浆热液成分的影响。

比利亚谷铅锌矿硫化物 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值域为293.5~306,平均300。从Ar同位素组成特征可以看出,除一个样品稍低外,所有样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值都稍高于饱和大气水的特征值(295.5),显示大部分流体中存在地壳放射性成因Ar($^{40}\text{Ar}^*$)(Andrews et al., 1979)。以上特征说明成矿流体具有含有一定放射成因Ar的大气降水端元。而每个流体包裹体中放射成因Ar的比例,可根据以下公式计算: $^{40}\text{Ar}^*=[(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})-296]/(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})$ (Kendrick et al., 2001)。计算结果显示,成矿流体中 $^{40}\text{Ar}^*$ 比例介于0.76%~3.28%之间,大气 ^{40}Ar 贡献介于96.72%~99.23%之间,表明成矿流体中Ar主要为大气来源,与大气平衡的饱和大气水参与了成矿。综合分析认为比利亚谷铅锌矿成矿流体均具有饱和大气水为主,少量岩浆流体与地壳流体混合的特征,但整体上具有浅成岩浆热液特点,这与前人对该矿床脉状矿石中石英、重晶石和闪锌矿中流体包裹体的研究成果是一致的(段明新等, 2014)。

4.3 成矿构造背景

得尔布干成矿带所在的额尔古纳地块经历了古亚洲洋构造域、蒙古-鄂霍茨克构造域及太平洋构造域多期造山活动影响(Wu et al., 2005)。蒙古-鄂霍茨克洋是一个“剪刀式”闭合的古大洋,从二叠纪至晚侏罗世—早白垩世从东向西逐渐闭合(Zorin, 1999; Kravchinsky et al., 2002; Donskaya et al., 2013; Jiang et al., 2020),相应地与蒙古-鄂霍茨克洋演化有关的钙碱性火山岩或深成岩相应的从西向东逐渐变新(江思宏等, 2010),并引发了一系列金属成矿作用(陈志广等, 2008; 武广等, 2014)。在多期构造作用控制下,得尔布干成矿带主要发育与印支期—燕山期中酸性火山侵入活动有关的铅、锌、银、铜、钼、金矿床,按照成矿时代和成矿特点,可划分出3个成矿作用阶段(武广等, 2014):

(1)与印支期—燕山早期中酸性侵入岩有关的

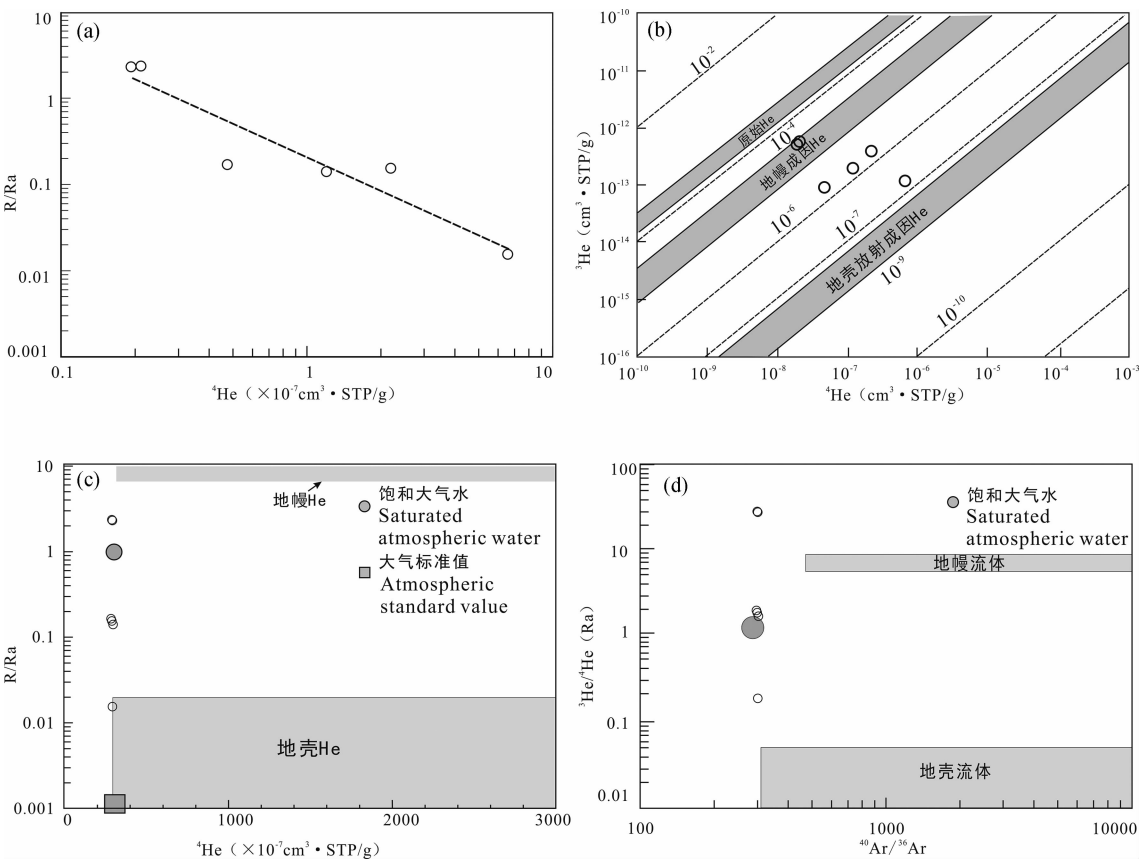


图 6 比利亚谷铅锌矿多金属矿化 He-Ar 相关图解

Fig. 6 He-Ar diagrams of fluid inclusions from the Pb-Zn polymetallic mineralization in the Biliyagu Pb-Zn deposit (a)—⁴He-R/Ra 图解(据 Zhai et al., 2012); (b)—⁴He-³He 同位素组成演化图(据 Mamyrin et al., 1984); (c)—⁴He-R/Ra 图解(据 Burnard et al., 1999); (d)—⁴⁰Ar/³⁶Ar-³He/⁴He 图解(据 Hu et al., 1999)

(a)—Diagram of ⁴He-R/Ra(after Zhai et al., 2012); (b)—diagram for composition and evolution of ⁴He-³He(after Mamyrin et al., 1984); (c)—diagram of ⁴He-R/Ra(after Burnard et al., 1999); (d)—diagram of ⁴⁰Ar/³⁶Ar-³He/⁴He(after Hu et al., 1999)

铜、钼、金成矿作用。该期成矿主要发育在额尔古纳隆起的中段,主要为斑岩型铜钼矿床和中低温热液脉型金矿床,典型矿床有乌奴格吐山斑岩型铜钼矿和小伊诺盖沟中低温热液脉型金矿。

(2)与燕山中—晚期中酸性火山侵入活动有关的铅、锌、银、金成矿作用。该期成矿主要发育在额尔古纳隆起区,部分矿床产在得尔布干断裂南东侧的额尔古纳-根河地区,主要为浅成低温热液型铅锌银矿床、银矿床和铜金矿床,亦有少量的矽卡岩型铅锌银矿床。典型矿床有甲乌拉低硫化浅成低温热液型铅锌银矿、额仁陶勒盖低硫化浅成低温热液型银矿、四五牧场高硫化浅成低温热液型金铜矿和下护林矽卡岩型铅锌银矿。该阶段主要成矿期为早白垩世。

(3)与燕山中—晚期中酸性火山侵入活动有关

的金、铜、钼成矿作用。该期成矿作用域主要产出于上黑龙江前陆盆地,主要发育中低温热液脉型金矿

床和斑岩型铜(金)矿床,及少量斑岩型铜钼矿点和低硫化浅成低温热液型金矿。典型矿床有砂宝斯中低温热液脉型金矿、二十一站斑岩型铜(金)矿等,主要成矿期为早白垩世。

得尔布干成矿带晚侏罗世—早白垩世矿床的成矿背景通常被认为与大兴安岭中南段相似,是太平洋板块于晚侏罗世—早白垩世向大陆俯冲的结果(葛文春等,2007; 余宏全等,2009,2012)。但徐志刚等(2008)、毛景文等(2013)提出得尔布干成矿带与大兴安岭成矿带的晚侏罗世—早白垩世矿床尽管成矿时代相近,但两者的成矿类型明显不同,前者主要是与火山-次火山热液密切相关的浅成低温热液矿床,后者主要是与花岗质侵入岩有关的岩浆热液矿床。得尔布干成矿带至早侏罗世,蒙古-鄂霍茨克洋闭合后引发陆-陆碰撞,大陆造山带演化至后碰撞阶段,应力条件由挤压转变为伸展构造环境(侯增谦等,2010)。早白垩世期间,本区处于板块俯冲后的

伸展构造环境,形成以 NE 向为主的一些张裂隙和构造破碎带以及与石英斑岩等与成矿密切相关的浅成-超浅成中酸性侵入体。由中酸性岩浆分异、演化形成的含矿流体,沿有利构造部位上升,萃取早期火山沉积地层中的 Pb,Zn,Ag 等大量成矿元素。当含矿热液沿张性裂隙上升到地壳浅部时,与下渗的大气降水发生流体混合作用,引起含矿热液系统的状态发生改变,破坏了原有的化学平衡,从而使大量的 Pb,Zn,Ag 等成矿物质沉淀成矿。额尔古纳地块南部甲乌拉-查干布拉、额仁陶勒盖及中部的比利亚谷、得耳布尔、东郡等矿床均属此类。区内南、北两侧铅锌银矿床成矿时代均分布在 143~124 Ma 之间,成矿地质背景一致、成矿时代相近,本次获得的比利亚谷铅锌矿成矿时代为 133.4 ± 4.4 Ma 与前人研究成果一致,显示其成矿时代为早白垩世,而 He、Ar 同位素组成也显示其成矿流体为岩浆流体与大气降水混合,整体具有浅成岩岩浆热液特点,反映了得尔布干成矿带内中生代铅锌矿床为同一成矿类型,属于与中酸性岩浆喷发-侵入作用有关的铜铅金银铅锌矿床成矿系列。

综上所述,我们认为得尔布干成矿带晚三叠世一早侏罗世斑岩型铜铅矿床形成于蒙古-鄂霍茨克洋向南俯冲的陆缘弧环境,而晚侏罗世一早白垩世热液脉型和矽卡岩型铅锌银矿床及浅成低温热液型贵金属矿床形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的碰撞后伸展环境。得尔布干成矿带中生代矿床的形成与北西侧的蒙古-鄂霍茨克洋造山过程有关,属于蒙古-鄂霍茨克成矿省的一部分。

5 结 论

- (1)比利亚谷铅锌矿床的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 133 Ma 左右,矿床形成于早白垩世早期。
- (2)比利亚谷矿床硫化物包裹体 He、Ar 同位素特征显示其主成矿期多金属矿化流体主要为地壳流体和饱和大气水的混合,但有少量幔源成分参与。
- (3)比利亚谷矿床形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的碰撞后伸展环境,得尔布干成矿带属于蒙古-鄂霍茨克成矿省的一部分。

注 释

① 内蒙古根河市森鑫矿业开发有限责任公司. 2010. 内蒙古自治区根河市比利亚谷铅锌矿床地质详查报告.

References

Bunter sandstone of England as indicators of age and palaeoclimatic trends. *Journal of Hydrology*, 41 (3-4): 233 ~252.

Burnard P G, Hu Ruizhong, Turner G, Bi Xianwu. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(10): 1595~1604.

Cai Minghai, Han Fengbin, He Longqing, Liu Guoqing, Chen Kaixu, Fu Jianming. 2008. He, Ar Isotope Characteristics and Rb-Sr Dating of the Xintianling Skarn Scheelite Deposit in Southern Hunan, China. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(2): 167 ~73 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Wan Bo, Zhang Yutao, Wu Huaying. 2008. Geochemistry and geological significances of ore-forming porphyry with low Sr and Yb value in Wunugetushan copper-molybdenum deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (1): 115 ~128 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Lu Baizhi, Li Zhanlong, Wu Huaying,Xiang Peng, Huang Shiwu. 2010. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (5) : 1437 ~ 1449 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Wan Bo, Wu Huaying, Clevon N. 2011. Geochronology and geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE China, and their geological significance. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 92~105.

Donskaya T V, Gladkochub D P, Mazukabzov A M, Ivanov A V. 2013. Late Paleozoic - Mesozoic subduction-related magmatism at the southern margin of the Siberian continent and the 150 million-year history of the Mongol-Okhotsk ocean. *The pedigree of the human race/*. H. Holt and Company.

Du Andao, Qu Wenjun, Li Chao, Yang Gang. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and technique. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3):288~304 (in Chinese with English abstract).

Duan Chao,Liu Feng, Han Dan, Li Yanhe. 2016. Noble gas isotope analytical techniques and its application in economic geology research. *Acta Geologica Sinica*, 90 (8): 1908 ~ 1921 (in Chinese with English abstract).

Duan Mingxin, Ren Yunsheng, Hou Zhaoshuo, Sun Deyou, Sun Azhenming, Qin Chaojian. 2014. Ore-forming fluid and ore genesis of the Biliya valley lead-zinc (silver) deposit in Erguna region, Inner Mongolia. *J Mineral Petrol*, 34(2):60~67 (in Chinese with English abstract).

Dunai T J, Baur H. 1995. Helium, neon, and argon systematics of the European subcontinentalmantle: implications for its geochemical evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (13): 2767~2783.

Feng Chengyou, Zhang Dequan, Qu Wenjun, Du Andao, Li Daxin, She Hongquan. 2006a. Re-Os isotopic dating of pyrite in the Tuolugou SEDEX cobalt (gold) deposit, golmud, Qinghai Province. *Acta Geologica Sinica*, 80(4):571~576 (in Chinese with English abstract).

Feng Chengyou, She Hongquan, Zhang Dequan, Li Daxin, Li Jinwen, Cui Yanhe. 2006b. Helium, arrgon, sulfur and lead isotope tracing for sources of ore-forming material in the Tuolugou cobalt (gold) deposit, golmud, Golmud City, Qinghai Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1465 ~1473 (in Chinese with English abstract).

Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, Zhang Jiheng. 2007. Metallogenic epoch and its geodynamic significance of porphyry Cu, Mo deposits in eastern margin of Xing-Meng orogenic belt. *Chinese Science Bulletin*, 52(20) : 2407~2417 (in Chinese).

Hou Zengqian. 2010. Metallogensis of continental collision. *Acta Petrologica Sinica*, 84 (1): 30 ~ 58 (in Chinese with English abstract).

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, Burnard P. 1999. Isotope

- geochemistry of He, Ar isotopic geochemistry from fluid inclusion of the Au deposits in Ailaoshan Au metallogenic belt. *Science in China (Series D)*, 29(4): 321~330 (in Chinese).
- Hu Ruizhong, Burnard P G, Bi Xianwu, Zhou Meifu, Peng Jiantang, Su Wenchao, Wu Kaixing. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion associated gold and copper deposits along the red river-Jinshajiang fault belt, SW China. *Chemical Geology*, 203(3-4): 305~317.
- Jean-Baptiste P, Fouqu E T Y. 1996. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13°N. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(1): 87~93.
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Su Yongjiang, Bai Daming, Liu Yifei. 2010. Geochronology and origin of the Erdenet superlarge Cu-Mo deposit in Mongolia. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 289~306 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yan, Jiang Suhua, Li Sanzhong, Wang Gang, Zhang Wen, Lu Leilei, Guo Lingli, Liu Yongjiang, Santosh M. 2020. Paleozoic to Mesozoic micro-block tectonics in the eastern Central Asian Orogenic Belt: insights from magnetic and gravity anomalies. *Gondwana Research*. doi.org/10.1016/j.gr.2020.06.013.
- Kendrick M A, Burgess R, Patricks R A D, Turner G. 2001. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphry mineralising fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(16): 2651~2668.
- Kendrick M A, Honda M, Pettke T, Scambelluri M, Phillips D, Giuliani A. 2013a. Subduction zone fluxes of halogens and noble gases in seafloor and forearc serpentinites. *Earth and Planetary Science Letters*, 365(1): 86~96.
- Kendrick M A, Burnard P. 2013b. Noble gases and halogens in fluid inclusions: a journey through the earth's crust. In: Burnard P, ed. *The Noble Gases as Geochemical Tracers*. Berlin, Heidelberg: Springer, 319~369.
- Kravchinsky V A, Cogné J P, Harbert W P, Kuzmin M I. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia. *Geophysical Journal International*, 148(1): 34~57.
- Lal D. 1987. Production of ^3He in terrestrial rocks. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 66(1-2): 89~98.
- Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao, Sun Wenjing. 2009. Comprehensive study on extraction of rhenium with acetone in Re-Os isotopic Dating. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 233~238 (in Chinese with English abstract).
- Li Chao, Qu Wenjun, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Du Andao. 2010. Advances in the study of the Re-Os isotopic system of organic-rich samples. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(4): 421~430 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinwen, Liang Yuwei, Wang Xiangyang. 2011. The origin of the Erdaohazi lead-zinc deposit, Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1745~1783 (in Chinese with English abstract).
- Li Tiegang, Wu Guang, Liu Jun, Hu Yanqing, Zhang Yunfu, Luo Dafeng. 2014. Rb-Sr isochron age of the Jiawula Pb-Zn deposit in the Manzhouli area and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 257~270 (in Chinese with English abstract).
- Li Tiegang, Wu Guang, Liu Jun, Wang Guorui, Hu Yanqing, Zhang Yunfu, Luo Dafeng, Mao Zhihao, Xu Bei. 2016. Geochronology, fluid inclusions and isotopic characteristics of the Chaganbulagen Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia, China. *Lithos*, 261: 340~355.
- Li Xiaofeng, Mao Jingwen, Wang Denghong, Luo Fuxun. 2004. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusion of the gold deposits along the Daduhe river, Sichuan Province, southwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 203~210 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liqun, Zhao Dongbo, Ma Zhonglin, Qian Li. 2012. Study on geological characteristics and genesis the Billia Ag-Pb-Zn mineral deposits in the northern of Derbugan metallogenic province. *Resources Environment & Engineering*, 26(3): 219~223 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1999. *A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel (Version 2.0)*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- Lyu Chuan, Gao Jianfeng, Qi Liang, Huang Xiaowen. 2020. Re-Os isotope system of sulfide from the Fule carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China: implications for Re-Os dating of Pb-Zn mineralization. *Ore Geology Reviews*, 103558.
- Ma Yubo, Xing Shuwen, Zhang Tong, Shao Jidong, Xiao Keyan, Wang Haipo, Guan Jidong, Fan Jianfu. 2015. Geochemical characteristics of REE and trace elements in the Biliyagu large Pb-Zn-Ag deposit of Eerguna area, Inner Mongolia and their metallogenic significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1841~1852 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yubo, Xing Shuwen, Xiao Keyan, Zhang Tong, Tian Fang, Ding Jianhua, Zhang Yong, Ma Lukuo. 2016. Geological characteristics and mineral resource potential of the Cu-Mo-Ag metallogenic belt in Daxinganling mountains. *Acta Geologica Sinica*, 90(7): 1316~1333 (in Chinese with English abstract).
- Mamyrin B A, Tolstikhin L N. 1984. *Helium Isotopes in Nature// Developments in Geochemistry 3*. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc: 1~273.
- Mao Jingwen, Kerrich R, Li Hongyan, Li Yanhe. 2002. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the Wangu gold deposit, Hunan Province, China: implications for mantle fluids along the Tanlu deep fault zone. *Geochemical Journal*, 36(3): 197~208.
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Wu Guang, Jiang Sihong, Liu Chenglin, Li Houmin, Ouyang Hegen, Liu Jun. 2013. Metallogenic regularity and minerogenetic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas. *Mineral Deposits*, 32(4): 715~729 (in Chinese with English abstract).
- Meng Qingren. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3-4): 155~174.
- Ming Zhu, Sun Jinggui, Yan Jia, Zhao Shifeng, Zhu Junquan, Liu Chen, Feng Yangyang, Yang Mei. 2015. Forming environment and magmatic-hydrothermal evolution history of andesite in Deerburg lead-zinc deposit of eastern Inner Mongolia: zircon U-Pb dating. *Global Geology*, 34(3): 590~598 (in Chinese with English abstract).
- Qian Cheng, Lu Lu, Qin Tao, Li Linchuan, Chen Huijun, Cui Tianri, Jiang Bin, Na Fuchao, Sun Wei, Wang Yan, Wu Xinwei, Ma Yongfei. 2018. The Early Late- Paleozoic granitic magmatism in the Zalantun region, northern Great Xing'an Range, NE China: constraints on the timing of amalgamation of Erguna-Xing'an and Songnen blocks. *Acta Geologica Sinica*, 92(11): 2190~2214 (in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Li Huimin, Li Weishi, Ishihara S. 1999. Intrusion and mineralization ages of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, Northwestern China. *Geological Review*, 45(2): 180~185 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Huaning. 1996. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating the quartz samples from two mineral deposits in western Yunnan (SW China) by crushing in vacuum. *Chemical Geology*, 127(1): 211~222.
- She Hongquan, Li Honghong, Li Jinwen, Zhao Shibao, Tan Gang, Zhang Dequan, Jin Jun, Dong Yingjun, Feng Chengyou. 2009. The metallogenetic characteristics and prospecting direction of the copper-lead-zinc polymetal deposits in the northern-central Daxing'anling mountain, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1456~1472 (in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, Guan Jidong, Yang Yuncheng, Zhang Dequan, Tan Gang, Zhang Bin. 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 571~594 (in Chinese with English abstract).
- Simmons S F, Sawkins F J, Schlatter D J. 1987. Mantle derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits. *Nature*, 329(6138): 429~432.

- Smoliar M L, Walker R J, Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A, and IV B iron meteorites. *Science*, 271(23): 1099~1101.
- Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, Fallick A E. 1994. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides. *Geology*, 22(9): 823~826.
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae HwaW-Momineralisation, South Korea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 4663~4673.
- Tang Yongyong, Bi Xianwu, Wu Liyan, Wang Lei, Zou Zhichao, He Liping. 2013. Re-Os isotopic dating of pyrite from Jinding Zn-Pb ore deposit and its geological significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 3(3): 287~294 (in Chinese with English abstract).
- Tian Shihong, Ding Tiping, Yuan Zhongxin. 2006. Mantle fluids in the Maoniuping LREE deposit, Sichuan Province: evidence of Pb-Sr-Nd, He-Ar isotopes and REE. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1035~1044 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guang, Sun Fengyue, Zhao Caisheng, Li Zhitong, Zhao Ailin, Pang Qingbang, Li Guangyuan. 2005. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(23): 2733~2743.
- Wu Guang, Mei Mei, Gao Fengjun, Li Zongyan, Qiao Cuijie. 2010. Ore-forming fluid characteristics and genesis of silver-lead-zinc deposits in the Manzhouli area, Inner Mongolia, China. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 239~255 (in Chinese with English abstract).
- WU Guang, Wang Guorui, Liu Jun, Zhou Zhenhua, Li Tiegang, Wu Hao. 2014. Metallogenic series and ore-forming pedigree of main ore deposits in northern Great Xing'an Range. *Mineral Deposits*, 33(6): 1127~1150 (in Chinese with English abstract).
- Wu Liyan. 2019. Advances of noble gas isotope geochemistry application in the study of ore deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 215~232 (in Chinese with English abstract).
- Wu Liyan, Hu Ruizhong, Li Xiaofeng, Sturt F M, Jiang Guohao, Qi Youqiang, Zhu Jingjing. 2018. Mantle volatiles and heat contributions in high sulfidation epithermal deposit from the Zijinshan Cu-Au-Mo-Ag orefield, Fujian Province, China: evidence from He and Ar isotopes. *Chemical Geology*, 480(5): 58~65.
- Wu Taotao, Zhao Dongfang, Shao Jun, Bao Qingzhong, Wang Hongbo. 2014. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Biliyagu lead-zinc-silver deposit, Inner Mongolia. *Chinese Geology*, 41(4): 1242~1252 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Li Houmin. 2008. The Scheme of the Classification of the Mineragenrtic Units in China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhitao. 2020. Ore genesis and geodynamic background of lead-zinc polymetallic deposits in Erguna area, Inner Mongolia. *Jilin University*, 1~202 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuncheng, Guo Wanjun, Wang Yajun, She Hongquan, Li Jinwen, Zhang Bin. 2015. Rb-Sr dating of sphalerites from Dongjun Pb-Zn deposit, Inner Mongolia and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 348~356 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Degao, Williams-Jones A E, Liu Jiajun, Selby D, Li Chao, Huang Xiaowen, Qi Liang, Guo Donghang. 2019. Evaluating the use of the molybdenite Re-Os chronometer in dating gold mineralization: evidence from the Haigou deposit, northeastern China. *Economic Geology* 114(5): 897~915.
- Zhai Wei, Sun Xiaoming, Wu Yunshan, Sun Yanyan, Hua Renmin, Ye Xianren. 2012. He-Ar isotope geochemistry of the Yaoling-Meiziwo tungsten deposit, North Guangdong Province: constraints on Yanshanian crust-mantle interaction and metallogenesis in SE China. *Chinese Science Bulletin*, 57(10): 1150~1159.
- Zhang Jiongfei, Wang Xianzhong, Quan Heng, Wu Guang, Zhu Hongchen. 2001. The forming condition of nonferrous and precious metal deposits in the north of Derbugan metallogenic province. *Geology and Resources*, 10(4): 221~225 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingzhou, Yang Baojun, Wu Fuyuan, Liu Guoxing. 2006. The lithosphere structure in the Hingmong-Jihe (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China. *Chinese Geology*, 33(4): 816~823 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunqiang, Li Shengrong, Chen Haiyan, Zhang Xiubao, Zhou Qifeng, Cui Juchao, Song Yubo, Guo Jie. 2012. Trace element and He-Ar isotopic evidence of pyrite for the source of ore-forming fluids in the Jinqingding gold deposit, eastern Shandong Province. *Chinese Geology*, 39(1): 195~204 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jing. 2014. Metallogenic characteristics and ore-controlling factors of the hydrothermal lead-zinc-silver deposits in the Derbugan metallogenic belt, NE China. *Geology and Resources*, 23(6): 525~530 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yan, Lv Junchao, Zhang Debao, Zhou Yongheng, Shao Jun, Wang Bing. 2017. Rb-Sr isochron age of De'rbur Pb-Zn deposit in Erguna massif of northeast Inner Mongolia and its geological significance. *Mineral Deposits*, 36(4): 893~904 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Zhang Dequan. 1997. Metallogeny and Prospective Evaluation of Copper-Polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountain and Its Adjacent Regions. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Zhao Yiming, Wu Liangshi, Bai Ge et al., 2004. Regularity of Main Metal Deposits of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhu Qun, Wu Guang, Zhang Jiongfei, Shao Jun, Zhu Hongchen. 2001. Metallogenic division and advances in exploration techniques of Derbugan metallogenic belt. *Chinese Geology*, 28(5): 19~27 (in Chinese).
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33~56.

参 考 文 献

- 蔡明海, 韩凤彬, 何龙清, 刘国庆, 陈开旭, 付建明. 2008. 湘南新田岭白钨矿床 He, Ar 同位素特征及 Rb-Sr 测年. *地球学报*, 29(2): 167~173.
- 陈志广, 张连昌, 卢百志, 李占龙, 吴华英, 相鹏, 黄世武. 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义. *岩石学报*, 26(5): 1437~1449.
- 陈志广, 张连昌, 万博, 张玉涛, 吴华英. 2008. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床低 Sr-Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 24(1): 115~128.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展. *岩矿测试*, 28(3): 288~304.
- 段超, 刘锋, 韩丹, 李延河. 2016. 稀有气体同位素测试技术及其在矿床学研究中的应用. *地质学报*, 90(8): 1908~1921.
- 段明新, 任云生, 侯召硕, 孙德有, 孙振明, 秦朝建. 2014. 内蒙古额尔古纳地区比利河谷铅锌(银)矿床成矿流体特征与矿床成因. *矿物岩石*, 34(2): 60~67.
- 丰成友, 张德全, 屈文俊, 杜安道, 李大新, 余宏全. 2006a. 青海格尔木骆驼沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年. *地质学报*, 80(4): 571~576.
- 丰成友, 余宏全, 张德全, 李大新, 李进文, 崔艳合. 2006b. 青海骆驼沟钴(金)矿床成矿物质来源的氦硫钨铅同位素示踪. *地质学报*, 80(9): 1465~1473.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu,

Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义. 科学通报, 52(20): 2407~2417.

侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论. 地质学报, 84(1): 30~58.

胡瑞忠, 毕献武, Turner G, Burnard P. 1999. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学(D 辑), 29(4): 321~330.

江思宏, 聂凤军, 苏永江, 白大明, 刘翼飞. 2010. 蒙古国额尔登特大型铜-钼矿床年代学与成因研究. 地球学报, 31(3): 289~306.

李超, 屈文俊, 杜安道, 孙文静. 2009. 铈-钕同位素定年法中丙酮萃取铈的系统研究. 岩矿测试, 28(3): 233~238.

李超, 屈文俊, 王登红, 陈郑辉, 杜安道. 2010. 富有机质地质样品 Re-Os 同位素体系研究进展. 岩石矿物学杂志, 29(4): 421~430.

李进文, 梁玉伟, 王向阳, 张斌, 杨郅城, 余宏全, 郭志军. 2011. 内蒙古二道河子铅锌矿成因研究. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1745~1783.

李铁刚, 武广, 刘军, 胡妍青, 张云付, 罗大峰. 2014. 大兴安岭北部甲乌拉铅锌银矿床 Rb-Sr 同位素测年及其地质意义. 岩石学报, 30(1): 257~270.

李晓峰, 毛景文, 王登红, 罗辅勋. 2004. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氡硫氢氧同位素示踪. 地质学报, 78(2): 203~210.

柳立群, 赵东波, 马忠林, 钱丽. 2012. 得尔布干成矿区北段比利亚银铅锌矿床地质特征及成因研究. 资源环境与工程, 26(3): 219~223.

马玉波, 邢树文, 张彤, 邵积东, 肖克炎, 王海坡, 关继东, 范建福. 2015. 内蒙古额尔古纳地区比利亚谷大型铅锌银矿床稀土微量元素地球化学特征及成矿意义. 地质学报, 89(10): 1841~1852.

马玉波, 邢树文, 肖克炎, 张彤, 田放, 丁建华, 张勇, 马路阔. 2016. 大兴安岭 Cu-Mo-Ag 多金属成矿带主要地质成矿特征及潜力分析. 地质学报, 90(7): 1316~1333.

毛景文, 周振华, 武广, 江思宏, 刘成林, 李厚民, 欧阳荷根, 刘军. 2013. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列. 矿床地质, 32(4): 715~729.

明珠, 孙景贵, 闫佳, 赵世峰, 祝浚泉, 刘晨, 冯洋洋, 杨梅. 2015. 内蒙古东部得耳布尔铅锌矿床安山岩的形成环境和岩浆热液演化史: 锆石 U-Pb 定年. 世界地质, 34(3): 590~598.

钱程, 陆露, 秦涛, 李林川, 陈会军, 崔天日, 江斌, 那福超, 孙巍, 汪岩, 吴新伟, 马永非. 2018. 大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代早期花岗岩岩浆作用——对额尔古纳-兴安地块和松嫩地块拼合时限的制约. 地质学报, 92(11): 2190~2214.

秦克章, 李惠民, 李伟实, Ishihara S. 1999. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的成岩、成矿时代. 地质论评, 45(2): 180~185.

余宏全, 李红红, 李进文, 赵士宝, 谭刚, 张德全, 金俊, 董英君, 丰成友. 2009. 内蒙古大兴安岭中北段铜铅锌金银多金属矿床成矿规律与找矿方向. 地质学报, 83(10): 1456~1472.

余宏全, 李进文, 向安平, 关继东, 杨郅城, 张德全, 谭刚, 张斌. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系. 岩石学报, 28(2): 571~594.

唐永永, 毕献武, 武丽艳, 王雷, 邹志超, 何利平. 2013. 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义. 矿物学报, 33(3): 287~294.

田世洪, 丁梯平, 袁忠信. 2006. 四川牦牛坪轻稀土矿床的地幔流体特征——铅钨钽和氡同位素及稀土元素整据. 地质学报, 80(7): 1035~1044.

武广, 糜梅, 高峰军, 李宗彦, 乔翠杰. 2010. 满洲里地区银铅锌矿床成矿流体特征及矿床成因. 地学前缘, 17(2): 239~255.

武广, 王国瑞, 刘军, 周振华, 李铁刚, 吴昊. 2014. 大兴安岭北部主要金属矿床成矿系列和区域矿床成矿谱系. 矿床地质, 33(6): 1127~1150.

武丽艳. 2019. 稀有气体同位素地球化学在矿床学研究中的应用进展. 岩石学报, 35(1): 215~232.

吴涛涛, 赵东芳, 邵军, 鲍庆中, 王宏博. 2014. 内蒙古比利亚谷铅锌银矿床地质地球化学特征及成因. 中国地质, 41(4): 1242~1252.

徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案. 北京: 地质出版社.

徐智涛. 2020. 内蒙古额尔古纳地区铅锌多金属矿床成因与成矿地球动力学背景. 吉林大学, 1~202.

杨郅城, 郭万军, 王亚君, 余宏全, 李进文, 张斌. 2015. 内蒙古东珙铅锌银矿床闪锌矿 Rb-Sr 定年及其地质意义. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 22(3): 348~356.

张炯飞, 王显忠, 权恒, 武广, 祝洪臣. 2001. 得尔布干成矿区(北片)成矿条件初步研究. 地质与资源, 10(4): 221~225.

张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 刘国兴. 2006. 中国兴蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征. 中国地质, 33(4): 816~823.

张运强, 李胜荣, 陈海燕, 张秀宝, 周起凤, 崔举超, 宋玉波, 郭杰. 2012. 胶东金青顶金矿床成矿流体来源的黄铁矿微量元素及 He-Ar 同位素证据. 中国地质, 39(1): 195~204.

赵京. 2014. 得尔布干成矿带热液型铅锌银矿成矿地质特征及控矿因素. 地质与资源, 23(6): 525~530.

赵岩, 吕骏超, 张德宝, 周永恒, 邵军, 王冰. 2017. 内蒙古东北部得耳布尔铅锌银矿床闪锌矿 Rb-Sr 年龄及地质意义. 矿床地质, 36(4): 893~904.

赵一鸣, 张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价. 北京: 地震出版社.

赵一鸣, 吴良士, 白鸽等. 2004. 中国主要金属矿床成矿规律. 北京: 地质出版社.

朱群, 武广, 张炯飞, 邵军, 祝洪臣. 2001. 得尔布干成矿带成矿区划与勘查技术研究进展. 中国地质, 28(5): 19~27.

Re-Os isotope age of pyrite and He-Ar isotope of sulfides from the Biliyagu Pb-Zn deposit in the northern Great Xing'an Range

MA Yubo^{*1)}, ZHANG Yong¹⁾, LI Lixing¹⁾, XING Shuwen²⁾, ZHANG Zengjie¹⁾, ZHANG Tong³⁾, XIAO Keyan¹⁾, WANG Haipo⁴⁾, FAN Jianfu¹⁾

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2) Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China;

3) Geological Survey of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China;

4) The Sixth Institute of Geology and Mineral Resources Development, Inner Mongolia Autonomous Region, Hailaer, Inner Mongolia 021008, China

* Corresponding author: mayb@cags.ac.cn

Abstract

The Biliyagu Pb-Zn deposit of the Derbugan metallogenic belt is located in the northwest of the Hailar-Genhe Mesozoic volcanic basin. This deposit is hosted in the felsic volcanic rocks of the Upper Jurassic Manketouebo Formation, with mainly veined type ore bodies controlled by the NW-trending faults. Due to lack of suitable minerals for traditional isotopic dating, the ore-forming age remains unknown, which has limited the understanding of the Pb-Zn mineralization. In this study, Re-Os isotopic dating of pyrite associated with galena and sphalerite has been performed to constrain the ore-forming age of the Biliyagu Pb-Zn deposit. Re-Os isotopic dating of hydrothermal pyrite yields an age of 133.4 ± 4.4 Ma, consistent with Pb-Zn mineralization age of the belt, suggesting that the Mesozoic Pb-Zn mineralization in the Derbugan metallogenic belt were generally simultaneous. He-Ar isotopic analyses of fluid inclusions in the sulfides show that the $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios are in the range of $0.02 \sim 2.37$ Ra and $293.5 \sim 306$, respectively, indicating that the ore-forming fluid in the main metallogenic stage represents a mixture of crustal-derived fluid and saturated atmospheric water, as well as a small amount of mantle-derived components. The Biliyagu deposit was formed in a post-collisional extensional environment after the closure of the Mongolia-Okhotsk ocean indicating that the Derbugan metallogenic belt is a part of the Mongolia-Okhotsk metallogenic province.

Key words: Biliyagu Pb-Zn deposit; pyrite Re-Os dating; He-Ar isotope; ore-forming age; metallogenic sources