

白云鄂博超大型稀土-铈-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年

刘玉龙 杨刚 陈江峰* 杜安道 谢智

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 地球物质循环实验室, 合肥 230026; 中国地质科学院, 国家地质实验测试中心, 北京 100037. * 联系人, E-mail: cjf@ustc.edu.cn)

摘要 从白云鄂博超大型稀土-铈-铁矿床的切割稀土矿化且与重晶石共生的晚期黄铁矿脉中, 选取6个黄铁矿样品, 对其进行了 Re-Os 定年, 结果表明它们分别含有 16~30 ng Re 和 0.10~0.16 ng Os, 给出加里东期的 439 ± 86 Ma 等时线年龄. 样品的高 Re/Os 比值和低含量高放射成因 Os 的组成特性支持这组黄铁矿样品为表壳构造成因. 构造演化历史表明, 华北地块北缘在早古生代属于被动大陆边缘, 而不是具有大量火山岩浆活动的俯冲带. 本次工作提供了一个新的证据, 支持白云鄂博矿床在加里东期经历了地壳成因的热扰动事件, 而使部分同位素体系记录了加里东期的扰动年龄, 而不是主要成矿期的年龄.

关键词 黄铁矿 Re-Os 定年 稀土矿化 扰动

白云鄂博超大型稀土-铈-铁矿床位于华北地块北缘中部, 北纬 41.7° , 东经 110.0° . 该矿床因为是世界最大的稀土矿床、中国最大的铈矿床, 并且还是一个大型的铁矿床而显得特殊. 有关该矿床的地质特征、矿物共生组合和年代学的研究, 已经有大量的文献报道^[1~6]. 但是因为不同的定年方法给出不同的成矿年龄, 而使得其成因的研究面临更多的疑问. Sm-Nd 矿物等时线法得到 1313 Ma^[6,7] 和 1250 Ma^[6,8] 的中元古代年龄, 矿石全岩 Sm-Nd 等时线法给出 1580 Ma^[9] 和 1286 Ma^[6,10] 的中元古代年龄, 独居石离子探针 U-Pb 法得到从近于 1000 Ma 到小于 400 Ma 的表面年龄^[11], 而独居石内部 Th-Pb 等时线法得到 $398 \sim 555$ Ma 的加里东期年龄^[3,12], 钠闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 的坪年龄为 $343 \sim 395$ Ma^[3]. 白云鄂博矿床的硫化物年龄结果只有刘兰笙等人^[13] 得到, 为一个辉钼矿数据点的 439 Ma. 刘玉龙等人^[14] 和张宗清等人^[15] 都提出白云鄂博矿床的矿体和围岩的样品中同时存在中-晚元古代和加里东期热事件的记载, 而显出白云鄂博矿区的复杂热历史. 本次黄铁矿 Re-Os 同位素研究是为确定白云鄂博矿床硫化物阶段的年龄及源区性质.

1 地质背景

白云鄂博矿床位于华北地块北缘, 矿区内出露的主要地层包括中元古界下白云鄂博群和少量的太古界五台群. 中元古界下白云鄂博群是矿区内主要地层, 由一套原岩为砂岩、粉砂岩、灰岩和白云岩组成的浅变质岩组成, 按岩性分为 H1 至 H10 十个岩性段^[16]. 矿区内的火成岩主要包括数量较多、但是年龄和地球化学性质尚在初步研究阶段的古老的非造山

岩浆岩^[17~20], 以及岩相变化明显且与矿化无关的海西期花岗杂岩体^[21]. 矿区的褶皱构造由宽沟背斜和白云向斜组成, 宽沟背斜核部出露 H1 和 H2 岩性段, 白云向斜的核部为 H9, H10 岩性段, H8 是赋矿层位, 矿体呈向形形态^[1,21]. 矿区内主干断裂是分布在矿区以北的近东西走向的宽沟断裂. 主要矿体是主矿和东矿, 还有西矿一系列小矿体和东部与海西期花岗岩有关的矽卡岩型矿体. 白云鄂博矿床矿物组成复杂^[1,31], 对矿石类型的分类也因为各种学术观点而不尽相同^[1,3,12]. 我们跟从中国科学院地球化学研究所^[11] 对矿石矿化的总结和分类, 其观点大体如下: 主、东和西矿体以氟-钠(钾)的矿化交代作用为主, 是主要的矿化阶段, 氟主要以萤石出现; 钠(钾)交代作用的主要表现形式为霓石化、钠闪石化和钠长石化, 钾交代作用表现为黑云母化和金云母化, 它们分别形成与霓石、钠闪石、黑云母和钠长石有关的矿化. 后期热液充填交代作用形成硫化物和碳酸岩的细脉, 切穿氟-钠交代阶段所形成的矿物组合. 本文研究的黄铁矿可能是属这一类型.

2 样品描述

我们在白云鄂博矿床共观察到 3 种黄铁矿: (1) 呈浸染状弥散分布于各类矿石中的黄铁矿; (2) 与磁黄铁矿共生的黄铁矿; (3) 与重晶石共生的块状黄铁矿. 本次研究的黄铁矿是从主矿采坑东南角采集的, 是与重晶石共生的黄铁矿. 重晶石呈块状, 与黄铁矿紧密接触, 但是在样品切割过程中, 重晶石脱落. 样号是 00BYC05, 将此标本切成 6 片, 每片编号为 00BYC05-1 至 00BYC05-6. 图 1 是其照片, 其暗色部

分的主要成分是霓辉石和磁铁矿(磁铁矿和霓辉石);黑色部分是一个萤石细脉(萤石脉),脉中的共生矿物有氟碳铈矿、独居石和磁铁矿;浅色部分是块状黄铁矿(黄铁矿),呈脉状;白色细脉(碳酸盐质脉)是碳酸盐质的,成因不明.上述关系说明所研究的黄铁矿比与霓石和萤石相伴生的稀土矿化都晚,属于晚期世代.黄铁矿样品结构致密,切面上无明显的裂缝或解理.又因为 6 个样品的产状和成因的一致性,可以认为这样的样品容易达到同位素定年的前提条件.

3 分析技术

Re-Os同位素分析是在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,原理和方法参见文献[22~25].样品使用富集的¹⁸⁵Re和¹⁹⁰Os混合稀释剂,在卡洛斯特管中溶解.Re用萃取和阴离子交换柱分离,Os用蒸馏法分离纯化.分析仪器是ICP-MS (PQ-excell).全流程Re空白为 0.108 × 10⁻⁹ g, Os空白为 0.0047 × 10⁻⁹ g.

4 结果

Re 和 Os 的含量和 Os 的同位素比值经扣除空白



图 1 白云鄂博矿床黄铁矿与稀土矿化关系(手标本照片)

后汇集在表 1 中,表中误差全部都是测量统计误差.将 6 个样品的¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os和¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os比值用ISOPLLOT程序处理后[26],得到 439±86 Ma的年龄(图 2).该组样品的高Re低Os含量、高Re/Os比值及高的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os同位素比值表明,样品中的 Os 是高放射成因的,与Arne等人[27]和stein等人[28]报道的金矿中硫化物的Re和Os的浓度、比值和¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os初始比都相似,具有明显的壳源特征.本次年龄结果误差较大,可能与ICP-MS的精度较低有关.实验流程由HLP(黄龙铺辉钼矿)监控,所以分析结果和年龄数据是可信的[25].

5 讨论

白云鄂博矿床矿化的定年数据中,因 Sm-Nd, U-Pb 和 Th-Pb 的结果相差很大而存在成矿时代上的争议.本文提供的黄铁矿 Re-Os 数据和矿相学证据表明在稀土矿化以后至少有一期以黄铁矿形成为代表的熟事件.

虽然本文中黄铁矿的 Re-Os 年龄和刘兰笙等人[13]的辉钼矿Re-Os模式年龄(439 ± 8 Ma)一致,为加里东期的年龄,而且在误差范围内与Chao等人[3]和Wang等人[12]的Th-Pb年龄也相似,但是将这一年龄解释为成矿或稀土矿化的年龄似乎不妥.稳定同位素研究表明,白云鄂博成矿与深源流体有关,但是经历了复杂的形成过程[29,30].矿相学关系表明,我们研究的黄铁矿显著晚于磁铁矿和稀土矿物的形成(图 1).Arne等人[27]和Stein等人[28]报道的Re-Os定年的硫化物都是与剪切带有关,属壳源成因,其中黄铁矿Re-Os体系的特征是:非常低的Os和很高的¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os比值,即所谓低含量高放射成因Os(LLHR),本次工作的黄铁矿与其非常相似.

中国科学院地球化学研究所[1]和张宗清等人[6]分别总结了白云鄂博矿床的硫化物和硫酸盐的δ³⁴S分布特点,黄铁矿的δ³⁴S值介于-7.8‰ ~ +11.1‰之间,

表 1 白云鄂博矿床黄铁矿Re, Os组成数据^{a)}

样品号	Re/10 ⁻⁹ g·g ⁻¹	Os/10 ⁻⁹ g·g ⁻¹	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os
00BYC05-1	16.43±0.06	0.1096±0.0001	2931±11	23.59±0.01
00BYC05-2	21.80±0.15	0.1323±0.0040	4767±880	38.526±0.034
00BYC05-3	23.94±0.14	0.1444±0.0009	3667±107	27.62±0.08
00BYC05-4	19.73±0.11	0.1177±0.0022	3722±323	27.80±0.08
00BYC05-5	29.06±0.23	0.1576±0.0001	6250±54	46.40±0.01
00BYC05-6	24.30±0.16	0.1420±0.0007	4887±151	37.92±0.09

a) 表中所有误差均为 2σ

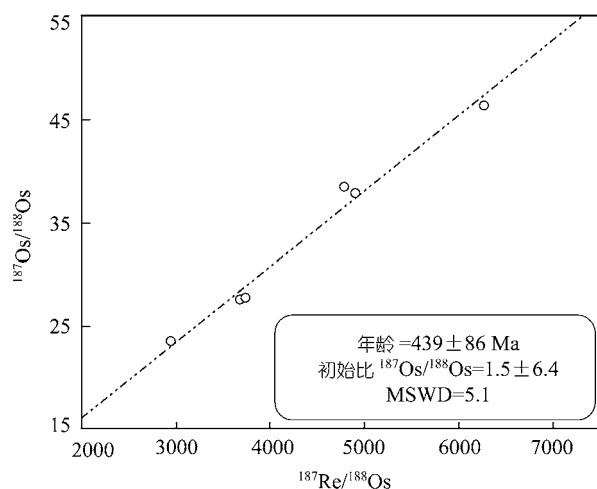


图2 白云鄂博矿床黄铁矿 Re-Os 等时线年龄

重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-2.1\text{‰} \sim +23.7\text{‰}$ 之间。白云鄂博矿床重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与黄铁矿不同,其最高值落入前寒武纪海水硫酸盐硫同位素组成范围,最低值与硫化物硫同位素组成相似^[6]。文献[1,6]的作者没有说明所分析的黄铁矿的世代,难以讨论 $\delta^{34}\text{S}$ 值的意义。但总体而言,多数黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近0值,具有深源特征。但不少黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化范围大,可达20%,显然是地壳硫介入的结果。重晶石 $\delta^{34}\text{S}$ 值高达 $+23.7\text{‰}$ 支持这一结论。本文中的黄铁矿样品是与重晶石共生的,属后期世代。根据矿物共生关系及Re-Os同位素体系的特征,我们认为本文中的黄铁矿可能是地壳成因的,跟成矿的深源流体并无紧密的关系,所以黄铁矿Re-Os年龄所代表的这一成矿后的热事件可能只是记录了表壳的构造事件,而与磁铁矿和稀土元素的主成矿期无关。

从白云鄂博地区的构造演化来看,在该区缺少大规模早古生代的岩浆活动,因而没有形成深源岩浆岩和成矿流体的构造条件。徐备等人^[31]指出晚志留世时华北地块北缘是被动大陆边缘,在中古生代晚期华北地块向北俯冲,西伯利亚南缘为活动大陆边缘,而不是像Chao等人^[3]引用赵春荆等人(1987)的文献中描述的西伯利亚板块向华北地块方向俯冲。Wang等人^[12]试图用加里东期的合教岩体支持西伯利亚板块向华北地块方向俯冲,以提供深源岩浆活动在成矿作用上的保证。但是Badarch等人^[32]更详细的工作却证明在早古生代期间,俯冲方向是向西伯利亚板块的,活动陆缘的岛弧也在西伯利亚一侧,新元古代~早古生代的岩浆及变质事件主要发生在靠近西

伯利亚南缘的位置。虽然在蒙古南部有两个年龄与白云鄂博Th-Pb年龄相近的地块^[31],但是其中的火山岩年龄更接近于泥盆纪。在白云鄂博地区缺少奥陶纪和志留纪的沉积,只是在乌兰宝力格深断裂以北有早古生代沉积,说明白云鄂博地区在早古生代处于隆起阶段。总之,华北地块北缘在早古生代缺少大规模的岩浆和变质活动,与俯冲板片引起的地幔物质上涌形成大型矿床的模式不符。

白云鄂博矿床年代学结果中Sm-Nd体系的年龄都是在中元古代^[6~10],中元古代有明显的岩浆活动^[10,33]。Th-Pb年龄则分布在398~555 Ma范围内,是岩浆活动不甚发育时期。独居石SHRIMP分析给出三组表面年龄^[11]: (1) 主矿体条带状矿石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均表面年龄为341 Ma,而 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 平均表面年龄为407 Ma; (2) 主矿下盘白云石型矿石中独居石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的平均表面年龄为801 Ma,而 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的平均表面年龄为498 Ma; (3) 东部接触带 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的平均表面年龄为994 Ma,而 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的平均表面年龄为475 Ma。文献[11]的作者对这些年龄的解释为多阶段成矿作用,仅把主矿 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄与 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄的显著不一致作为一个问题提出。我们认为,除了多阶段成矿的可能性以外,不同的同位素体系所给出的不同的表面年龄所记录的很可能是不同的地质事件。即Sm-Nd体系给出中元古代的成矿年龄,U-Pb体系给出中-晚元古代的同位素时钟不完全重置年龄,Th-Pb体系只保存了早古生代的扰动年龄。我们的数据表明后期地质作用对白云鄂博矿床的同位素时钟是有影响的,甚至有可能导致Th-Pb体系的完全重置。总结白云鄂博地区和华北地块北缘构造演化及前人对白云鄂博矿床定年结果,我们认为白云鄂博矿床经历过多期地质作用^[6,8,11,14,15],主成矿期在中元古代^[6~10,15],在早古生代华北地块和西伯利亚地台碰撞时,遭受了强烈的构造作用,Th-Pb和Re-Os定年体系记录了这一事件,Re-Os等时线定年的结果还进一步表明这一事件的构造成因和壳源属性。

6 结论

本次工作的结果得到白云鄂博矿床晚期矿化产物黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 439 ± 86 Ma, 样品具有高的 Re/Os 比值、高的放射成因 Os 比值,但极低的 Os 含量,具有壳源成因的特征。通过对白云鄂博矿床及邻区地质演化历史的对比,我们认为这一期黄铁矿是在华北板块向西伯利亚板块拼合过程中,

因被动陆缘地壳的形变引起的热液交代作用形成的,而成矿作用与这一早古生代的板块俯冲作用所产生的岛弧岩浆作用无关. 这一以黄铁矿为标志的热事件应该是白云鄂博矿床矿化以后的重要扰动事件,并且对矿体内某些同位素时钟的重置起到显著作用.

致谢 野外地质考察和样品采集得到包头钢铁公司白云鄂博矿肖国望工程师、张台荣工程师和吴占江工程师的帮助,在此表示真诚的感谢. 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999043201)资助.

参 考 文 献

- 中国科学院地球化学研究所. 白云鄂博矿床地球化学. 北京: 科学出版社, 1988. 1~496
- 白鸽, 袁忠信. 白云鄂博矿床地质特征和成因论证. 北京: 地质出版社, 1996. 1~103
- Chao E C T, Back J M, Minkin J A, et al. The Sedimentary Carbonate Giant Bayan Obo REE-Fe-Nb Ore Deposit of Inner Mongolia, China: A Cornerstone Example for Giant Polymetallic Ore Deposit of Hydrothermal origin. US Geological Survey Bulletin, 1997, 2143: 1~65
- Chao E C T, Back J M, Minkin J A. Host-rock controlled epigenetic, hydrothermal metasomatic origin of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia, PRC. Applied Geochemistry, 1992, 7: 443~458[DOI]
- Chao E C T, Tasumoto M, Minkin J A, et al. Multiple lines of evidence for establishing the mineral paragenetic sequence of the Bayan Obo rare earth ore deposit of Inner Mongolia, China. In: Proceedings of International Association on the Genesis of Ore Deposits, 8th Symposium volume. Stuttgart: E Schweizerbart, 1993. 53~73
- 张宗清, 袁忠信, 唐索寒, 等. 白云鄂博矿床年龄和地球化学. 北京: 地质出版社, 2003. 1~205
- 任英忱, 张英臣, 张宗清. 白云鄂博稀土超大型矿床的成矿时代及其主要地质热事件. 地球学报, 1994, (1-2): 95~101
- 张宗清, 唐索寒, 袁忠信, 等. 白云鄂博矿床白云岩的 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素体系. 岩石学报, 2001, 17(4): 637~642
- Yuan Z, Bai G, Wu C, et al. Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia, China. Applied Geochemistry, 1992, 7: 429~442[DOI]
- 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 白云鄂博稀土矿床形成年龄的新数据. 地球学报, 1994, (1-2): 85~94
- 裴愉卓. 白云鄂博独居石 SHRIMP 定年的思考. 地球学报, 1997, 18(增刊): 211~213
- Wang J, Tasumoto M, Li X, et al. A precise ^{232}Th - ^{208}Pb chronology of fine-grained monazite: Age of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, China. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(15): 3155~3169[DOI]
- 刘兰竺, 高翔, 杜安道, 等. 白云鄂博稀土型矿床中辉钼矿的铼-钨同位素年龄. 矿床地质, 1996, 15(2): 188~191
- 刘玉龙, 彭谷洋, 张翼, 等. 白云鄂博赋矿地层 H8 白云岩的 U-Pb 和 Pb-Pb 定年. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 274~277
- 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 白云鄂博矿床形成于不同时代的信息——矿体西矿体的年龄和讨论. 中国地质, 2003, 30(2): 130~137
- Drew L J, Meng Q, Sun W. The Bayan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. Lithos, 1990, 26: 43~65
- 范宏瑞, 陈福坤, 王凯怡, 等. 白云鄂博 REE-Fe-Nb 矿床碳酸岩墙锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 2002, 18(3): 363~368
- 王凯怡, 范宏瑞, 谢奕汉, 等. 白云鄂博超大型 REE-Fe-Nb 矿床基底杂岩的锆石 U-Pb 年龄. 科学通报, 2001, 46(16): 1390~1393
- 王一先, 裴愉卓, 高计元, 等. 内蒙古白云鄂博矿区元古代非造山岩浆岩及其对成矿的制约. 中国科学, D 辑, 2002, 32(增刊): 21~32
- Yang X M, Yang X Y, Zheng Y F, et al. A rare earth element-rich carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China. Mineralogy and Petrology, 2003, 78: 93~110[DOI]
- 杨学明, 杨晓勇, 范宏瑞, 等. 白云鄂博海西期花岗岩岩体的稀土元素地球化学. 稀土, 2000, 21(2): 1~7
- 杜安道, 何宏蓼, 殷宁万, 等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究. 地质学报, 1994, 68(4): 339~347
- Mao J, Zhang Z, Zhang Z, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(11/12): 1815~181[DOI]
- Du A D, Wang S X, Sun D Z, et al. Precise Re-Os dating of Molybdenite using Carius tube, NTIMS and ICPMS. In: Piestrzynski, et al, eds. Mineral Deposits at the 21st Century, Proceedings of the sixth biennial SGA-SEG Meeting, Krakov, Poland, 2001. 405~407
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄. 岩矿测试, 2001, 20(4): 247~252
- Ludwig K R. Isoplot—a plotting and regression program for radiogenic isotope date. US Geol Surv Open-file Report, Version 2.75, 1994, 91-445. 47
- Arne D C, Bierlein F P, Morgan J W, et al. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia. Economic Geology, 2001, 96: 1455~1459
- Stein H J, Morgan J W, Schersten A. Re-Os dating of Low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas golds deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. Economic Geology, 2000, 95: 1657~1671
- 方涛, 裴愉卓. 白云鄂博矿床稀土矿物稳定同位素特征及其意义. 矿床地质, 1997, 6(1): 31~40
- 方涛, 裴愉卓. 白云鄂博矿床独居石氧同位素组成特征及其意义. 地球化学, 1997, 26(1): 45~53
- 徐备, 陈斌. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化. 中国科学, D 辑, 1997, 27(3): 227~232
- Badarch G, Cunningham D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 21: 87~110[DOI]
- Zhai M, Shao J, Hao J, et al. Geological signature and possible position of the north China Block in the supercontinent Rodinia. Gondwana Research, 2003, 6(2): 171~183

(2004-04-21 收稿, 2004-08-20 收修改稿)