内蒙古赛乌素金矿稳定同位素 组成特征及成因意义

赵百胜^{1,2}, 刘家军^{1,2}, 王建平^{1,2}, 翟裕生^{1,2}

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083;

2. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室,北京 100083)

摘 要: 内蒙古赛乌素金矿是产于中-新元古代白云鄂博群变质碎屑岩中的石英脉型金矿,矿 床稳定同位素地球化学特征表明,成矿热液来源复杂,可能有岩浆水和大气降水的混合作用;成矿 早期的硫来自花岗岩浆,成矿晚期的硫有一部分可能来自地层,铅同位素特征表明铅来自地幔,因 此推断成矿物质主要来自于岩浆活动。

关键词: 稳定同位素;成矿物质来源;赛乌素金矿;内蒙古 中图分类号: P597.2;P618.51 文献标识码: A 文章编号: 100 P 1412(2007) 03-0195-06

0 引言

赛乌素金矿位于内蒙古中部华北地台北缘白云 鄂博裂谷带内,是一个产于中-新元古代白云鄂博 群变质碎屑岩中的中型石英脉型金矿。胡鸿飞 等^[1]、张春雷等^[2]研究认为:成矿物质主要来自白云 鄂博群,海西期构造岩浆活动对成矿具有重要作用。 本文通过氢、氧、硫、铅稳定同位素地球化学特征对 成矿物质来源进行探讨。

1 矿床地质特征

赛乌苏金矿为一中型金矿床,位于白云鄂博北 10 km 处(图 1)(右侧为赛乌苏金矿,左侧为干斯陶 勒盖金矿点)。矿区分为两部分,南区位于白云鄂博 稀土- 铌- 铁矿的北矿区;北区为哈拉忽鸡一库列、 赛音乌苏地区,以 32 号含金石英脉为主体组成,两 个地区总面积 37.2 km²。目前由包头市达茂旗赛 乌素黄金矿业有限责任公司开采。

本区位于华北地台北缘狼山 一白云鄂博台缘白云

鄂博褶断束内,出露新太古界色尔腾山群、中--新元古 界白云鄂博群、志留系、石炭系、侏罗系及第四系。

区域构造表现为复式背斜,轴向近 EW,次一级 褶皱也极为发育。断裂以近 EW 向、NE 向为主,近 EW 向断裂形成较早,为一组断层面 N 倾,走向 NWW 的逆断层,具有叠瓦式构造和多期活动的特 点。其中,川井一镶黄旗深断裂从赛乌素北侧穿过, 形成时间最早。

本区岩浆岩主为加里东期、海西期形成。加里 东期岩浆岩为中基性,沿 NWW 向断裂零星分布。 海西期中酸性岩浆岩十分发育。岩体分布于复背斜 及穹窿构造之核部,其次沿北部槽台分界断裂喷出 (C¹b)。海西期这次构造热事件,为本区金的活化、 迁移乃至最后富集成矿起着至关重要的作用。

矿区出露白云鄂博群尖山组两个岩性段:一为 浅变质碎屑岩段(赋矿岩段),一为碳质板岩段,围绕 前者分布。区内发育哈拉忽鸡背斜,为南翼 N 倾的 同斜褶皱,且发育层间褶曲。断裂也较发育,与金矿 化关系密切的断裂为川井一镶黄旗深断裂和 F₃ 大 断裂及其派生的次级构造。海西期花岗伟晶岩脉在 穹窿核部的浅变质碎屑岩中较为发育,呈 EW 向展 布。说明其下有岩体存在。

收稿日期: 2007 02 15; 改回日期: 2007 06 07

基金项目:中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室科学基金(GPMR200638)和内蒙古地质勘查重大科研项目(内地研 2004-02)资助。

作者简介:赵百胜(1978),男,河北唐山人,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。



图 1 白云鄂博北部金矿地质略图(据胡鸿飞等^[1],略有修改)
 Fig. 1 Geological sketch of gold deposits in north Baiyun Obo
 Q. 第四系 C₁b. 下石炭统本巴图组 Pt₂b. 中-新元占界白云鄂博群比鲁特组
 Pt₂b. 中-新元古界白云鄂博群哈拉正疙特组 Pt₂j. 中-新元古界白云南鄂博群尖山组
 Pt₂d. 中-新元古界白云鄂博群都拉哈拉组 Ars. 太古宇色尔腾山群
 ¥4. 海西期花岗岩 δ4. 闪长岩 Σ1. 超基性岩
 1. 正断层 2. 逆断层 3. 金矿脉及编号

金矿化带呈近 EW 向的脉状、透镜状产于哈拉忽鸡 背斜变质长石石英砂岩的脆性断裂带中,由北(32 号脉群)、中(96号)、南(203号)矿带构成(图1)。 其中 32 号脉群位于背斜北翼, 96 号位于背斜北翼 近轴部地区,203号位于背斜南翼。中矿带未见工 业矿体,其他矿带均见金矿体。矿体平均厚1.0~ 3.0m, 干脉长 400~600 m, 倾角较陡。北矿带品位 6.0×10⁻⁶~10.6×10⁻⁶,南矿带平均品位15.14× 10⁻⁶。矿石类型主要为贫硫化物石英脉型和少量蚀 变岩型。矿石以他形粒状结构为主,次为交代结构、 填隙结构,斑杂状、脉状、晶洞状构造。 金属矿物有 黄铁矿、磁黄铁矿、褐铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、自 然金等。非金属矿物主要为石英,次为云母、长石、 绿泥石、高岭土、方解石等。成矿过程分为热液阶段 和表生阶段,热液阶段分为金-毒砂-黄铁矿阶段、 金- 多金属硫化物阶段和(金)- 碳酸盐阶段。自然 金的赋存状态以包裹体金和裂隙金为主,其次为粒 间金。围岩蚀变主要有硅化、绿泥石化、绢云母化和 碳酸盐化。近2年,在深部发现了隐伏含金地质体, 主要为石英脉型和糜棱岩化蚀变岩型。

2 氢、氧同位素组成

对赛乌素金矿床含金石英脉中的 δ(¹⁸Ο) 和石

英流体包裹体水的 $\mathcal{L}(D)$ 进行了分析(表 1)。结果表 明, 石英的 $\mathcal{L}^{18}O$) = 12. 6×10⁻³~ 14. 2×10⁻³, 石英 流体包裹体的 $\mathcal{L}(D)$ = -102×10⁻³~ -110×10⁻³。

该矿床主成矿期温度为 200~ 280 ℃^[3], 取中值 240 ℃, 根据石英-水¹⁸O 的分馏方程(Robert *et al*, 1972)^[4]:

1000 ln α(¹⁸O_{石英- 水}) = 3.38×10⁶/*T*²-3.4 式中, α(¹⁸O_{石英- 水})为石英与水之间¹⁸O的分馏系数; *T* 是绝对温度。



图 2 赛乌素金矿流体包裹体水氢氧同位素图解

Fig. 2 δ (18O) – δ (D) diagram of the water in fluid inclusions in Saiw usu gold deposit

计算得到流体包裹体水的 δ(¹⁸ O) = 3.1 × 10⁻³ ~ 4.7 × 10⁻³。为了探讨成矿流体来源,将所得流体 包裹体氢氧同位素值投于图 2,投点很集中,集中分 布于岩浆水区域的下部,表明成矿热液来源比较复 杂,可能有岩浆水和大气降水的混合作用。

表1 赛乌素金矿氢氧同位素组成

Table 1	The H,	0 isotope	composition o	f Saiwusu	go ld	deposi
---------	--------	-----------	---------------	-----------	-------	--------

	样品名称	δ(¹⁸ O _{V-SMOW} , 石英) / 10 ⁻³	$\delta(18 D_{V-SM OW, 7K}) / 10^{-3}$	$\delta(^{18}O_{V-SMOW, -3K}) / 10^{-3}$
SWS-014	石英	12. 6	- 107	3. 1
SWS 018(2)	石英	13.5	- 102	4.0
SW S 019	石英	14. 2	- 104	4.7
SWS-S-2	石英	14. 1	- 110	4.6

测试者:国土资源部矿产资源研究所万德芳。

3 硫同位素组成

硫同位素样品采自含金石英脉中,从中挑选出 硫化物单矿物,再用研钵将单矿物磨至 200 目左右, 送国土资源部同位素实验室测试。测试数据和前人 数据见表 2。

表 2 赛乌素金矿硫同位素组成表

Table 2The sulfur isotopic composition of
Saiw usu gold deposit

编号	样品名称	$\delta({}^{34}\mathrm{S}_{V\text{-}CDT})$	资料来源
05SW S 1	毒砂	4.6	
05SWS 2	闪锌矿	9	- 4
05SWS 3	黄铁矿(与毒砂共生)	5.2	4×
SWS-018(2)	方铅矿	7.4	
SWS014	方铅矿(32 号脉)	7.5	
SWSS016	黄铁矿(32 号脉)	10.1	
SWS052	黄铁矿(南采场)	10	
赛 S1	黄铁矿(32 号脉)	9.71	非共会体
赛 S2	方铅矿(32 号脉)	7.36	
赛 S3	方铅矿(32 号脉)	方铅矿(32 号脉) 4.53	
赛 S4	方铅矿(49 号脉)	3.69	
赛 S5	方铅矿(26 号脉)	5.28	
赛 S6	方铅矿(26 号脉)	3.07	

测试单位:国土资源部同位素实验室罗续荣;单位:10-3。

地球不同体系的硫同位素组成十分复杂。陨石、MORB和原始地幔的 $\delta({}^{34}S)$ 变化于0值附近,岛弧玄武岩-安山岩、火山的 $\delta({}^{34}S)$ 变化于0~<10×10⁻³,花岗岩类一般为-10×10⁻³~10×10⁻³,现代海水和海洋沉积物有较高的 $\delta({}^{34}S)$,淡水和淡

水硫化物有较大的值域范围, 一般为- $20 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3[6]}$ 。不同地质时期海水硫酸盐的 $\delta(^{34}S)$ 变化为 $10 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3}$, 在开放体系中, 由此还原形成的硫化物的 $\delta(^{34}S)$ 为- $10 \times 10^{-3} \sim -50 \times 10^{-3[7]}$ 。

从表1中可见,赛乌素金矿硫化物 $\delta({}^{34}S) =$ 3.07×10⁻³~10.1×10⁻³,平均值为6.7×10⁻³,为 较低的正值。其中成矿阶段早期毒砂和黄铁矿δ (³⁴S)分别为 4.6×10⁻³和 5.2×10⁻³。其余黄铁矿 的 δ(³⁴S) = 9.71×10⁻³~10.1×10⁻³, 闪锌矿的 δ $({}^{34}S) = 9 \times 10^{-3}$,方铅矿的 $\delta({}^{34}S) = 3.07 \times 10^{-3} \sim$ 7.36×10⁻³,呈现降低的趋势。这说明成矿热液中 的硫同位素基本达到了平衡。赛乌素金矿床原生矿 石的矿物组合为黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、 毒砂、石英、云母、长石、绿泥石、高岭土、方解石等。 根据 Ohmoto(1972)^[8] 的研究, 此种矿物 组合属于 氧逸度中等- 较低的成矿环境,在此种状态下,黄铁 矿的 & ³⁴S) 值近于体系硫同位素值, 故黄铁矿可以 代表成矿热液体系的硫同位素数值。黄铁矿的 $\delta(^{34}$ S) 值范围相对较广, 早期黄铁矿 δ(³⁴S) 较低, 后期的 黄铁矿 δ(³⁴S) 较高,反映了成矿早期的硫来自花岗 岩浆,成矿晚期的硫有一部分可能来自地层。

4 铅同位素特征

对各金矿含金石英脉中的硫化物和与硫化物共 生的长石和石英进行了铅同位素测试(表 3)。从测 试结果看,铅同位素组成比较一致,²⁰⁸ Pb/²⁰⁴ Pb 的范 围为 36. 9558 ~ 37. 1743,²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb 的范围为 15. 3583~ 15. 3989,²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 的范围为 16. 3995 ~ 16.6877。

将铅同位素投于坎农三角图解(Cannon et al, 1961)^[9]中(图4),投点都位于普通铅范围内,说明 铅同位素以普通铅为主,不含放射成因铅。按单阶 段铅演化模式 H-H 法(Russell et al, 1960)^[10],参 数采用国际地科联年代学分会推荐值(Doe et al, 1974)^[11],利用 Geokit 软件(路远发, 2004)^[12]计算 的赛乌素金矿模式年龄为1166~1327 Ma(表3)。 赛乌素金矿模式年龄明显大于成矿年龄179Ma(裴 荣富等,1991)^[5],可见金矿的矿石铅为异常铅,铅同 位素演化经过了两阶段或多个阶段。

将同位素组成投入 Zartman 构造模式 图^[13] 中(图 5),数据点位于地幔铅演化曲线附近,说明铅来自深部。

表 3 赛乌素金矿铅同位素组成

fable 3	Pb isot ope	composition of	Saiwusu 🛽	old deposit
	1 10 10 00 0 0 0 0	composition of		, ora a op oon

编号	矿物	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	模式年龄(Ma)
SWS-018	方铅矿	36. 9796	15.3792	16. 5325	1254
05SWS-3	黄铁矿	37.1166	15.3732	16.5401	1243
05SWS-2	闪锌矿	36. 9558	15.3585	16. 3995	1327
05SWS-1	毒砂	37.1743	15.3989	16.6877	1166
05SWS-1	钾长石	37. 1331	15.3958	16. 6819	1167

测试单位:中国地质科学院地质研究所同位素实验室李世珍。



in Saiwusu gold deposit



 $Fig. \ 4 \quad Cannon \ Plot \ showing \ the \ region \ of \ Pb \ isotopes$

²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb-²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 坐标图(图 4),连成一条直
线。该直线可称为次等时线,该直线与铅的单阶段
增长曲线有一交点(Russell *et al*, 1960)[10]。次等
时线公式的斜率 R⁽¹⁰⁾:

$$R = \frac{1}{137.88} \bullet \frac{e^{\lambda_5 t_1} - e^{\lambda_5 t_2}}{e^{\lambda_8 t_1} - e^{\lambda_8 t_2}}$$

式中: t_1 为异常铅源区 U-Pb 体系发生改变的时间; t_2 为含异常铅矿物结晶时间, λ 和 λ 表示²³⁵ U 和 ²³⁸ U的衰变常数, 其中 $\lambda = 0.98485 \times 10^{-9}$, $\lambda = 0.155125 \times 10^{-9}$

先确定 *t*¹ 和 *t*² 中的某一个值, 就可以根据 R 值, 求出 另一个值(李志昌等, 2004; 韩发, 2006)^[14,15]。将赛乌素金矿硫化物数据点构成一条 次等时线,等时线处理使用 ISOPLOT 2.06(Lud-



图 5 赛乌素金矿铅同位素构造模式图解

Fig. 5 Lead isotopic composition in Saiw usu gold deposit

多阶段演化的赛乌素金矿铅同位素数据投于

wig, 1991)^[16], 斜率 $R = 0.137 \pm 0.054(20,95\%$ 置 信度), M SWD= 0.21。取矿化年龄为 179 M a(裴荣 富等, 1991)^[5], 即 $t_2 = 179 \times 10^6$ a, R = 0.137, 来求赛 乌素金矿异常铅源区 U-Pb 体系发生改变的时间。 利用 M athematica 5.2 软件, 求得 $t_1 = 2.10655$ Ga。 王惠初等(2005)^[17]研究认为华北克拉通2.1Ga时存 在构造热事件, 这可能是异常铅源区 U-Pb 体系发 生改变的原因, 因此赛乌素金矿的铅源于古老基底。

5 成矿物质来源探讨

综上所述, 根据氢、氧、硫、铅同位素特征, 推断 成矿热液来源复杂, 可能有岩浆水和大气降水的混 合作用, 硫主要来自岩浆, 铅来自于深部。成矿物质 主要来自于岩浆活动。最新研究^[18,19] 表明, 矿区及 区域主要出露印支期 S 型强过铝花岗岩。在华北板 块与西伯利亚板块强烈碰撞缝合之后, 转入伸展体 制下岩石圈"剥离"和热软流圈上涌发生地壳深融作 用而形成的, 为碰撞后环境, 属陆内造山作用的产 物, 源岩为含泥质成分高的岩石。据此推测, 在华北 板块与西伯利亚板块强烈碰撞造山之后的碰撞后构 造阶段, 产生了大量的花岗岩, 这些起源于下地壳的 岩浆携带了深部的成矿物质, 最终侵入到地壳浅部 发生了成矿作用。

致谢:本文在样品采集过程中,得到赛乌素金矿 各级领导和工作人员的大力支持,在此表示衷心的 感谢!

参考文献:

- [1] 胡鸿飞,李体刚,闫丽英,等.内蒙古白云鄂博北部金矿成矿特
 征及找矿方向[J].黄金地质,2004,10(1):2428.
- [2] 张春雷.内蒙古赛乌素金矿成矿地质特征及其找矿方向[J]. 黄金,1999,20(10):812.
- [3] 李惠,任密礼,郑豪,等.赛乌素金矿床的某些地球化学特征及

地球化学找矿标志[J]. 地质与勘探, 1988, 24(12): 45-50.

- [4] Robert N C, James R O, Toshiko K. Mayeda oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(17): 3057-3067.
- [5] 裴荣富.内蒙古(包头市)赛音乌苏-老羊壕-十八倾壕地区 与金矿有关的花岗岩地质特征研究[R].北京:地矿部矿床研 究所,1991.7115.
- [6] Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, presentar tion, interpretation [M]. New York: Longman Science and Technical, Published in the United States with John Wiley and Sons, Inc, 1992. 1-343.
- [7] 韩吟文,马振东. 地球化学[M]. 北京:地质出版社,2003.246 259.
- [8] Ohmoto H. systemtics of sulfur and carbon istopes in Hgdrσ thermal or e Deposits [J]. Economic Geology, 1972, 67(2): 551-579.
- [9] Cannon R S, Pierce A P, Antweiler J C, et al. The data of lead isotope geology related to problems of or egenesis [J]. Economic Geology, 1961, 56: 1-38.
- [10] Russell R D, Farquhar R M. Lead isotopes geology [M]. New York: Wiley Interscience, 1960.
- [11] Doe B R, Stacey J S. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and prospect evoluation: a review
 [J]. Economic Geology, 1974, 69: 757-776.
- [12] 路远发. GeoKit: 一个用 V BA 构建的地球化学工具软件包 [J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459 464.
- [13] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135-162.
- [14] 李志昌,路远发,黄圭成.放射性同位素地质学方法与进展[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.198193.
- [15] 韩发.如何解释陈家杖子金矿的铅同位素资料——与佘宏全
 等商榷[J].矿床地质,2006,25(5):582589.
- [16] Ludwig K R. Isoplot A plotting and regression program for radiogenic isotope data [R]. US Geological Survey Oper File Report. 1991, 39: 91445.
- [17] 王惠初, 陆松年, 赵风清. 华北克拉通古元古代地质记录及 其构造意义[J]. 地质调查与研究, 2005, 28(3):129-143.
- [18] 许立权,邓晋福,陈志勇.内蒙古中部印支期强过铝质花岗岩的相平衡约束及动力学背景[J].地质通报,2004,23(8):790 794.
- [19] 陶继雄,胡凤翔,陈志勇.华北陆块北缘印支期S型花岗岩带
 特征及其构造环境[J].岩石矿物学杂志,2003,22(2):112
 118.

STABLE ISOTOPIC COMPOSITION AND THE SIGNIFICANCE TO GENESIS OF SAIWUSU GOLD DEPOSIT, INNER MONGOLIA, CHINA ZHAO Bai sheng^{1,2}, LIU Jia jun^{1,2}, WANG Jian ping^{1,2}, ZHAI Yu sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and

Lithosphere Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Saiwusu gold deposit, located in central Inner Mongolia, is a medium-size quartz vein type gold deposit associated with metamorphic clastic rock in the Middle Upper Proterozoic Bayun Obo Group. H, O, S, Pb isotopes were analyzed and discussed. The results show that: ore forming fluid maybe originated from magmatic water and meteoric water; sulfur from granite in the early stage and from sedimentary sequence in the late stage; lead from mantle. Thus, the author considers that ore forming materials are from magmatic activity.

Key Words: stable isotopes; origin of ore forming materials; Saiwusu gold deposit; Inner Mongolia

欢迎订阅 2008 年《黄金》 杂志

《黄金》杂志于 1980 年创刊,是由中华人民共和国新闻出版总署批准,中国黄金集团公司主管,长春黄金研究院主办的黄 金行业惟一的综合性科技刊物。主要报道黄金及其相关行业在经济管理、黄金市场、(黄金及贵金属)工业应用、黄金地质、采 矿工程、机电与自动控制、选矿与冶炼、分析与环保等方面的科研成果和综合评述,以及新理论、新技术、新动态、新方法、新工 艺、新设备、生产技术经验等内容,同时还开辟了首饰之苑、企业之窗、信息纵横、专利技术、读编往来等栏目。

《黄金》杂志为全国中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、美国《化学文摘》(CA)检索文献源、 《中国学术期刊综合评价数据库》统计刊源,并被《中国期刊网》、《中国期刊全文数据库》、《中文科技期刊数据库》、《万方数据——数字化期刊群》和《中国核心期刊(遴选)数据库》全文收录,入编《中国学术期刊(光盘版)》。《黄金》杂志荣获冶金工业系统优秀期刊奖和吉林省优秀期刊奖。

《黄金》杂志是黄金行业权威性科技期刊,内容翔实,信息量大,实用性强,覆盖面广,现已遍布黄金、冶金、地质矿产、有色 金属、环境保护、化工、机械、核工业、金融及金银珠宝饰品等行业。

《黄金》广告合理的价格定位,全方位的优质服务,为客户提供了理想的宣传平台。通过《黄金》广告宣传,有助于树立企业形象,创出企业名牌,提高企业知名度,促进产品销售,增加企业效益。

《黄金》杂志为月刊,国际标准刊号 ISSN 1001-1277,国内统一刊号 CN 22-1110/TF,国际刊名代码 CODEN HANG FV,彩色封面,国际开本(297mm×210mm),64页,国内外公开发行。国内邮发代号 12-47,全国各地邮局均可订阅;国外发 行代号 M 3331,由中国国际图书贸易总公司承办。国内每期定价 10.00元,全年定价 120.00元。订阅者请到当地邮局(所) 订阅,也可直接通过《黄金》杂志社发行部订阅。

 地址:吉林省长春市南湖大路 6760 号《黄金》杂志社发行部
 邮编:130012

 网址: http://www.ccgri.com/gold
 电子信箱: journal@ ccgri.com

 电话: (0431) 85529838-8002 85514586-3066
 6真: (0431) 8552186