矿 床 地 质
1994年 MINERAL DEPOSITS 第13卷 第2期

内蒙古乌拉山石英-钾长石脉金矿床铅和硫同位素研究*

聂凤军 裴荣富 吴良士 张洪涛
（地质矿产部矿床地质研究所，北京）
Arne Bjorlykke
（挪威奥斯陆大学地质学系，挪威奥斯陆）

提 要：内蒙古乌拉山金矿床是近年在我国北方发现的大型金矿床之一。矿床主要由赋存在太古界乌拉山群变质岩地层中一系列石英-钾长石脉和石英脉组成。矿区范围内晚古生代—中生代花岗岩类分布广泛并且同金矿化具密切时、空分布关系。本文对乌拉山金矿床，大桦背花岗岩体和变质岩地层的硫、铅同位素比值进行了系统测定，并解释了不同地质体硫、铅同位素变化特征。研究表明：金成矿作用发生在 240×10^6a，成矿物质主要来自大桦背花岗岩体及有关的岩脉，乌拉山金矿床形成过程中，亦有部分非岩浆物质混入。

主题词：内蒙古乌拉山 金矿床 硫铅同位素 矿床成因

乌拉山金矿床位于内蒙古包头市近郊。区内太古界和元古界变质岩以及古生代和中生代花岗岩类分布广泛。金矿区及外围的金、铁和稀土元素的找矿勘探工作始于50年代初期，迄今为止，已发现各类金属矿床（点）约数百处。称著于世的白云鄂博 Fe-REE 矿床就位于该区北部约 120 km 处。近年来先后在乌拉山及邻区共找到具有经济价值的金矿床 4 处，即乌拉山、十八倾壕、老羊壕和赛音乌苏矿床。在这 4 个金矿床中，乌拉山石英-钾长石脉和石英脉金矿床规模最大。

本文试图在详细的矿床地质研究基础上，利用含金石英-钾长石脉、石英脉（这两类脉以下统称含金脉体）、斜长角闪岩、闪长玢岩、矽线-黑云母片麻岩和大桦背花岗岩体的硫、铅同位素测试数据，结合岩（矿）石等证据，详细讨论了乌拉山金矿床的成矿时代、物质来源和演化历史，目的旨在为确定该区乃至整个包（头）-白（云鄂博）地区金矿床成矿模式和找矿勘探方向提供理论依据。

1 地质背景

乌拉山地区出露的地层单元主要为太古界集宁群、乌拉山群和色尔腾山群变质岩系以及

* 国家青年自然科学基金（项目编号49000040）资助项目
聂凤军，男，37岁，副研究员。长期从事铜、金矿床地质和岩石学研究，邮政编码：100037
1993-12-25收稿，1994-2-3修改回。刘浩龙、陶景连编辑

元古界渣尔泰群变质火山-沉积岩系，古生代—中生代海、陆相沉积岩和火山岩亦可见及(图1)❶。集宁群主要由矽线石-石榴石-钾长石片麻岩、麻粒岩和斜长角闪岩，局部地段见有紫苏花岗岩。乌拉山群是本区最重要的金矿床容矿围岩，主要岩石类型为斜长角闪岩、变粒岩、片麻岩、混合岩、大理岩和磁铁石英岩，其中斜长角闪岩锆石U-Pb年龄为(2531±3)×10^6 a❷。太古界色尔腾山群和中元古代渣尔泰群主要分布在研究区北部和西北部。前者由斜长角闪岩、片麻岩、云母-石英片岩和大理岩组成；后者主要为石英岩、绿片岩和大理岩。此外，区内尚见有零星分布的古生代碳酸盐和碎屑岩以及大面积分布的侏罗系—白垩系火山沉积岩。

研究区内构造形迹复杂，岩浆岩分布广泛。其中阴山山前东西向深大断裂和大桦背-合

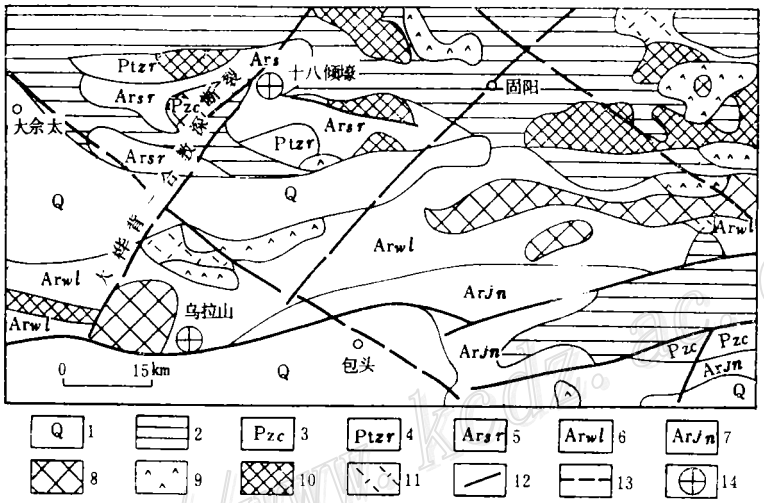

图 1 内蒙古包头—固阳一带区域地质略图

(根据张洪涛，1991资料改编)

1—第四系；2—侏罗系和白垩系火山沉积岩建造；3—古生界海相沉积岩建造；4—元古界渣尔泰群变质火山-沉积岩；5—太古界色尔腾山群绿片岩；6—太古界乌拉山群片麻岩-大理岩-斜长角闪岩-混合岩；7—太古界集宁群片麻岩和麻粒岩；8—古生代大桦背花岗岩体；9—古生代花岗岩类；10—元古代花岗岩；11—太古代花岗岩类；12—断层；13—推测断层；14—金矿床

Fig. 1. Diagrammatic geological map of Baotou-Guyang area, Inner Mongolia.

1—Quaternary; 2—Jurassic-Cretaceous volcano-sedimentary formation; 3—Paleozoic marine sedimentary formation; 4—Metamorphosed volcano-sedimentary rocks of Proterozoic Chaertai Group; 5—Greenschist of Archean Seertengshan Group; 6—Gneiss-marble-plagioclase amphibolite-migmatite of Archean Wulashan Group; 7—Gneiss and granulite of Archean Jining Group; 8—Late Paleozoic Dahuabei granite batholith; 9—Paleozoic granitoids; 10—Proterozoic granite; 11—Archean granitoids; 12—Fault; 13—Inferred fault; 14—Gold deposit.

教-达茂北东向隐伏大断裂分别位于乌拉山金矿床的南部和西侧，为重要的控岩控矿构造。本区最重要的侵入岩为位于金矿床西侧的大桦背花岗岩基。该岩体侵入到太古界乌拉山群和色尔腾山群变质岩地层中，出露面积约400 km^2。野外地质调研结果表明：大桦背岩体派生

❶ 内蒙古自治区地质局，1972，区域地质测量报告（固阳幅、余太镇和白云鄂博幅）

❷ 张洪涛，1991，内蒙古包头—白云鄂博地区花岗岩浆系列及金的成矿作用。中国地质科学院博士研究生论文（未刊）

出的许多岩枝（或脉）多呈东西向展布，北倾68°～84°，个别岩枝走向延长达300m。局部地段含金石英-钾长石脉与花岗岩石英脉岩呈过渡关系，岩体内部亦分布有含金石英脉。大桦背岩体岩性相对均一，主要为中粗粒花岗岩和富钾长石花岗岩。两类岩石的主要造岩矿物有微斜条纹长石（$Or=78\sim84,36\%$）、斜长石（$An=17\sim22,34\%$）、石英（25%）及黑云母（4%），副矿物组合为磁铁矿、钛铁矿、磷灰石和锆石以及微量榍石、褐帘石和黄铁矿，局部地段尚见有辉钼矿、白钛石，曲晶石和金红石。大桦背岩体K-Ar同位素年龄为（190～217）$\times 10^6$a❶。

同大桦背岩体相比，花岗岩类岩枝（或岩脉）以具较高钾长石含量和斑状结构为特征。斑晶有微斜长石、正长石、奥长石（$An=14\sim18$）和石英以及少许黑云母，基质由细粒（0.01～0.5mm）石英、正长石、钠长石和奥长石残留体组成，副矿物组合为磁铁矿、磷灰石和黄铁矿，局部地段，偶尔可见方铅矿和褐帘石。

矿区范围内闪长玢岩、细晶岩、伟晶岩和辉绿岩墙分布广泛，并且多沿近东西向和北东向构造产出。

2 矿床地质特征

乌拉山金矿床位于大桦背岩体东侧，矿床主要由一系列近东西向的含金石英-钾长石脉、钾长石脉和石英脉组成，容矿围岩为太古界乌拉山群变质岩地层（图2）。

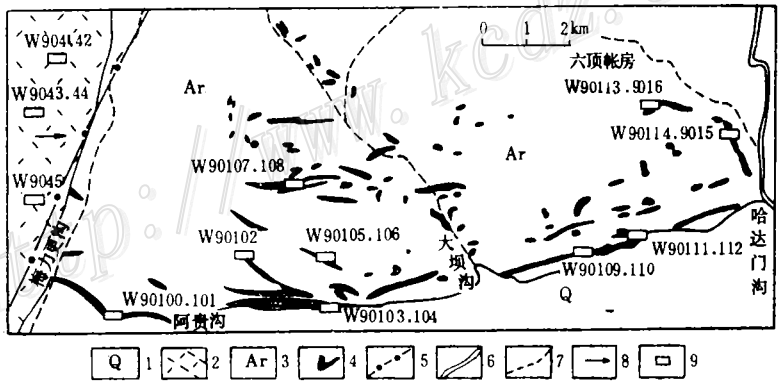

图 2 内蒙古乌拉山金矿床地质略图

（根据张洪涛，1991资料改编）

1—第四系；2—太古界乌拉山群斜长角闪岩、片麻岩、麻粒岩和混合岩；3—大桦背花岗岩基；4—含金石英-钾长石脉、钾长石脉和石英脉；5—推测深大断裂；6—季节性河流；7—沟、路；8—大桦背花岗岩体侵位方向；9—采样位置

Fig. 2. Geological sketch map of the Wulashan gold deposit, Inner Mongolia.

1—Quaternary; 2—Plagioclase amphibolite, gneiss, granulite and migmatite of Archean Wulashan Group; 3—Dahuabei granite batholith; 4—Auriferous K-feldspar-quartz veins, K-feldspar veins and quartz veins; 5—Inferred deep-seated fault; 6—Seasonal stream; 7—Gully and track; 8—Emplacement direction of Dahuabei granite batholith; 9—Sampling location.

❶ 郎殿友，1990，内蒙古乌拉山金矿地质特征及成矿地质条件。内蒙古地质，第2期，第30～40页

野外地质调查和岩（矿）相学研究结果表明：大约90％以上的含金脉体产出在角闪斜长片麻岩和矽线-石榴石片麻岩内，部分在斜长角闪岩内。含金脉体的走向长度从几 米 到几百米不等，宽度变化范围为数十厘米到几米。依据矿物共生组合和形成阶段，含金脉体大致可划分为三种类型：①石英-钾长石脉：脉体大都沿变质岩地层层理和片理产出，并 且 遭受到强烈变形、破碎和热液蚀变影响。迄今已圈定含金石英-钾长石脉（或钾长石脉）近百条，为乌拉山金矿床最具特色的含金脉体；②石英脉：同含金石英-钾长石脉相比，含金 石 英脉以含较多硫化物和较少钾长石为特征；③含金蚀变岩和含金碳酸盐-玉髓脉：在 部 分含金脉体旁侧产出，沿构造破碎带分布。这二类地质体金矿化规模较小和金品位相对较低，一般很难构成具有经济价值的金矿体。①和②类脉体的矿物组成比较简单，其中硫化物含量约占所有矿物含量的 4 ％。黄铁矿是最常见的硫化物。此外，还见有菱铁矿、黄铜矿、方铅矿和镜铁矿。在一些脉体中，亦可见有微量磁铁矿、钛磁铁矿、闪锌矿、毒砂、硬锰矿、辉铋矿、白铅矿、泡铋矿、磷钇矿、自然铜和自然金。含金石英脉中的浸染状黄铁矿多呈自形粒状（立方体和五角十二面体）或它形—半自形粒状。同晶体发育完整的黄铁矿相比，它形粒状黄铁矿具有较高的金含量。金主要呈自然金在黄铁矿和石英内产出，并且呈细小包裹体赋存在针碲金银矿和含金锑银矿以及矿物间隙或裂隙中。自然金的成色一般大于780，最高可达900。

石英和钾长石是含金脉体中最主要的脉石矿物，此外，尚见有绢云母、绿泥石、角闪石、辉石和方解石。电子探针分析结果表明❶：从大桦背岩体→花岗岩类脉岩→含金石 英-钾 长石脉→石英脉，钾长石 K_2O 含量（％）从87→10.56→11.79→12.23，而 Na_2O含量（％）从3.34→2.25→1.56→0.24（以上均为 4 件样品平均值）。

含金脉体旁侧的热液蚀变主要有钾长石化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、绢云母化、高岭石化和绿泥石化，其中钾化和硅化分布广泛，并且同金矿化密切相关。

3 样品硫、铅同位素分析方法

笔者对金矿区范围内的含金脉体、斜长角闪岩、矽线石-黑云母片麻岩、闪长 玢 岩和大桦背花岗岩体分别进行了硫和铅同位素测定。供同位素分析的样品均是在野外采集，经室内簿片鉴定和微量元素分析数据对比后选取的。钾长石和硫化物单矿物是采用常规分离技术进行分离的。

3.1 硫同位素

方铅矿和黄铁矿硫同位素比值是在挪威卑尔根大学同位素实验室MAT 230质谱仪上完成的。使用的标准分别为 CDT 和 LTB，标准物质常规分析精度为±0.2‰。

3.2 铅同位素

硫化物是利用 2 NHCl 溶解的，而钾长石和斜长角闪岩全岩样品则是通过 超纯浓 HF和 HNO_3 溶解的。铅的化学提取采用氢溴酸式阴离子交换法。全部化学处理过程是在挪威奥斯陆大学超净同位素实验室进行的，本实验室流程本底对铅小于10 ng，对铀小 于 1 ng。质谱分析采用硼硅胶法，也是在该实验室 VGM 30质谱仪上进行的。对 NBS 981国际标准30次的

❶ 聂凤军，1993，未刊资料

测定结果表明：质谱分析精度对$^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$和$^{208}Pb/^{204}Pb$分别为0.07%、0.09%和0.10%，对$^{207}Pb/^{206}Pb$为0.04%，各件样品测定的内部精度均好于0.001%。详细的铅同位素化学处理和质谱分析过程可参阅Birkeland（1990）的文献[3]，数据计算采用Ludwige（1990）法[7]。

4 结果和讨论

4.1 硫同位素

含金脉体及其围岩20件硫化物（黄铁矿和方铅矿）硫同位素分析结果列于表1。含金石英-钾长石脉黄铁矿的$\delta^{34}S$变化范围为－2.5‰～－8.4‰，而含金石英脉黄铁矿和方铅矿$\delta^{34}S$值相对较低，分别为－6.5‰～－9.7‰和--12.3‰～－13.5‰。大桦背花岗岩和闪长玢岩中的黄铁矿均以富^{34}S为特征，其$\delta^{34}S$变化范围分别为＋1.3‰～＋2.0‰和＋2.6‰～＋4.1‰。

表1 内蒙古乌拉山金矿床及有关岩石硫化物硫同位素比值

Table 1. Sulfur isotopic composition of the Wulashan gold deposit and related rocks, Inner Mongolia

序号	样品号	采样位置	产状	矿物	$\delta^{34}S/(‰)$
1	W90-20	L.No.1	含金石英-钾长石脉	黄铁矿	－2.5
2	W90-21	L.No.2	含金石英-钾长石脉	黄铁矿	－3.8
3	W90-22	L.No.5	含金石英-钾长石脉	黄铁矿	－8.4
4	W90-23	L.No.5	含金石英-钾长石脉	黄铁矿	－7.0
5	W90-24	L.No.6	含金石英-钾长石脉	方铅矿	－12.4
6	W90-25	L.No.6	含金石英脉	黄铁矿	－6.5
7	W90-26	L.No.6	含金石英脉	黄铁矿	－8.5
8	W90-27	L.No.3	含金石英脉	方铅矿	－13.5
9	W90-28	L.No.3	含金石英脉	黄铁矿	－8.2
10	W90-29	L.No.3	含金石英脉	黄铁矿	－9.7
11	W90-30	L.No.2	含金石英脉	方铅矿	－12.3
12	W90-31	L.No.2	含金石英脉	黄铁矿	－7.5
13	W90-32	L.No.2	含金石英脉	黄铁矿	－8.4
14	W90-45		金矿区外围闪长	黄铁矿	＋2.6
15	W90-46		玢岩脉	黄铁矿	＋4.1
16	W90-52		矽线黑云母片麻岩	黄铁矿	－17.0
17	W90-54		角闪斜长片麻岩	黄铁矿	－18.3
18	W90-55		角闪斜长片麻岩	黄铁矿	＋18.5
19	W90-56		大桦背花岗岩	黄铁矿	＋1.3
20	W90-57		大桦背花岗岩	黄铁矿	＋2.0

4.2 铅同位素

含金脉体中17件方铅矿和黄铁矿铅同位素比值列于表2，并且投绘在$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图中（图3）。由表2和图3可见，乌拉山金矿床方铅矿和黄铁矿铅同位素数据大体可分为二组，为了描述方便，笔者分别将它们称为A组和B组硫化物。A组硫化物主要由13件方铅矿和黄铁矿组成，它们分别采自相对新鲜和未遭受到风化的含金脉体。由图3可

表 2 内蒙古乌拉山金矿床及有关岩石铅同位素比值

Table 2. Lead isotopic composition of the Wulashan gold deposit and related rocks, Inner Mongolia

序 号	编号	位置	产 状	测试矿物	$\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{207}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{208}Pb}{^{204}Pb}$
1	W90100	L.No.1	含金石英-钾长石脉	方铅矿	17.0639	15.4004	36.5711
2	W90101	L.No.1		黄铁矿	17.4901	15.4599	37.0491
3	W90102	L.No.2	含金石英脉	黄铁矿	17.4034	15.4493	37.1860
4	W90103	L.No.3	含金石英脉	黄铁矿	17.3253	15.4347	37.1617
5	W90104	L.No.3	含金石英脉	黄铁矿	17.7517	15.5067	37.2432
6	W90105	L.No.4	含金石英脉	黄铁矿	16.8657	15.3531	37.2832
7	W90106	L.No.4	含金石英脉	黄铁矿	15.9374	15.2154	36.0667
8	W90107	L.No.5	含金石英-钾长石脉	方铅矿	17.5481	15.4673	37.0542
9	W90108	L.No.5		黄铁矿	18.8749	15.6839	38.5014
10	W90109	L.No.6	含金石英脉	黄铁矿	18.6916	15.6599	38.5023
11	W90110	L.No.6	含金石英脉	黄铁矿	16.8860	15.3559	36.5502
12	W90111	L.No.7	含金石英-钾长石脉	黄铁矿	17.3663	15.4399	37.0767
13	W90112	L.No.7		黄铁矿	17.6723	15.4866	37.2264
14	W90113	L.No.8	含金石英脉	黄铁矿	17.3416	15.3613	37.0431
15	W90114	L.No.8	含金石英脉	黄铁矿	18.3465	15.4688	37.3523
16	W90115	L.No.9	含金石英脉	黄铁矿	17.6458	15.4067	37.1864
17	W90116	L.No.9	含金石英脉	黄铁矿	18.0625	15.4667	37.3031
18	W9050(s)		斜长角闪岩	全岩	17.6712	15.5003	37.1401
19	W9051(1)		斜长角闪岩	全岩	16.4082	15.2906	36.0021
20	W9052(2)		斜长角闪岩	全岩	16.6095	15.3227	36.2814
21	W9053(3)		斜长角闪岩	全岩	15.7554	15.1866	36.1323
22	W9054(s)		斜长角闪岩	全岩	17.9644	15.3267	37.0391
23	W9041		大桦背花岗岩	钾长石	18.2516	15.5993	38.2635
24	W9042		大桦背花岗岩	钾长石	18.8583	15.7002	38.3831
25	W9043		大桦背花岗岩	钾长石	19.0083	15.7266	38.3164
26	W9044		大桦背花岗岩	钾长石	18.6520	15.6667	38.2161
27	W9045		大桦背花岗岩	钾长石	19.2333	15.7599	38.4167

(s)—斜长角闪岩全岩未淋滤样品；(1)—不同阶段淋滤组分

见，A组硫化物大都以$^{207}Pb/^{204}Pb$比值相对较高，$^{206}Pb/^{204}Pb$和$^{208}Pb/^{204}Pb$比值变化相对较大为特点。此外，就铅同位素组成而言，含金脉体中的方铅矿与黄铁矿并无明显差别。在$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图(图3)中，所有A组硫化物铅同位素数据均排列在一条直线上，其斜率为0.1599。这条铅同位素混合线与Stacey和Kramers (1975)[10]地球铅平均演化线分别在 $(2455\pm67)\times10^6$ a 处和 $(230\pm15)\times10^6$ a 处相交，反映硫化物形成时铅的混合过程。一般来讲，黄铁矿U和Th含量极低，在无其它地质因素干扰的情况下，它的铅同位素组成不随时间而发生变化，黄铁矿与方铅矿的共线性 (Collinear) 亦证实了这一点。在$^{208}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图中(见后文图7)，A组硫化物Pb同位素数据多沿造山带铅平均线分布，其Th/U比值与造山带铅“标准值”(3.5～4.0) 并无明显差别。

同A组硫化物相比，B组硫化物（4件黄铁矿）均是从强烈风化的含金石英脉分离出来的，其铅同位素数据投绘在A组硫化物混合线之下。在所分析的4件黄铁矿样品中，3件样

品构成一条基本与A组硫化物铅混合线相平行的铅线。该铅混合线同Stacey和Kramers（1975）[10]地球铅平均演化线分别在2398×10^6 a和342×10^6 a处相切。样品W90110采自含金石英脉风化壳，其内大约有2/3黄铁矿已部分风化为褐铁矿，样品以富^{206}Pb为特征，所以其投绘点远离上述铅混合线（图3）。

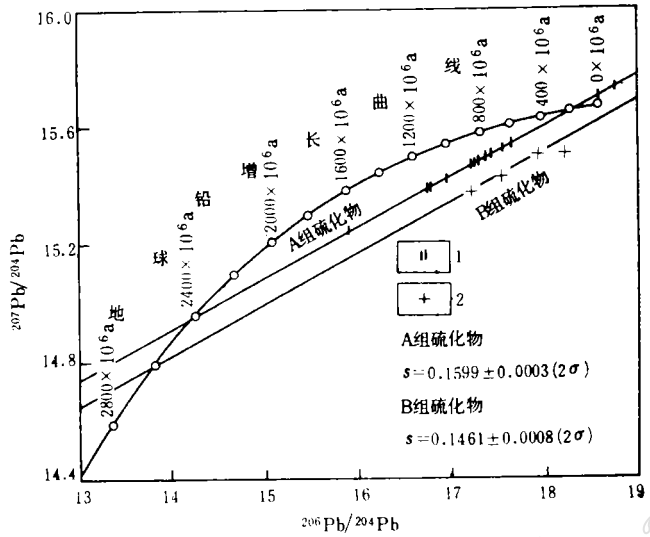

图 3 内蒙古乌拉山金矿床含金石英-钾长石脉和石英脉硫化物$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图

1—A组硫化物（黄铁矿和方铅矿）；2—B组硫化物（黄铁矿）；S—斜率

Fig. 3. $^{207}Pb/^{204}Pb$ versus $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram of sulfides from the auriferous K-feldspar-quartz veins and quartz veins of the Wulashan gold deposit, Inner Mongolia.

1—Sulfides of Group A (pyrite and galena); 2—Sulfides of Group B (pyrite); S—Slope.

两件斜长角闪岩全岩样品采自含金石英脉旁侧。为了获取此类岩石铅同位素初始比，笔者对样品W9050进行了三阶段淋滤实验，并且对各阶段淋滤组分进行了铅同位素比值测定。铅同位素测试数据列于表2并投绘在图5中。在$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图中（图4），样品W9050及其淋滤组分数据构成一条Pb-Pb线，其斜率为0.1640，相应的年龄值为（2498±76）$\times10^6$ a（2σ）（Ludwig，1990）[7]。该年龄值与乌拉山群变质镁铁火山岩锆石U-Pb年龄（2521±63）$\times10^6$ a相近，代表了斜长角闪岩的形成时代。此外，地球铅平均演化线与斜长角闪岩Pb-Pb线分别在2400×10^6 a和230×10^6 a处相交，后者略高于大桦背岩体K-Ar法下限年龄（217×10^6 a），反映了变质火山岩U-Th-Pb体系演化与晚期岩体的成因联系。

斜长角闪岩样品W9054遭受到强烈绿泥石化、绢云母化和黄铁矿化，其铅同位素比值投绘在前述2498×10^6 a等时线之下。由于目前我们尚不能确定W9054样品是否与岩浆期后热液流体达到同位素平衡，也不清楚它在2498Ma Pb-Pb线上的位置，因此，在样品W9050及其淋滤组分Pb-Pb线计算过程中，并没有包括这一数据。

大桦背花岗岩体4件钾长石样品的铅同位素比值列于表2，并且投绘在图5、6和7中。尽管钾长石放射性成因铅含量高于斜长角闪岩和含金脉体硫化物，但是它们也构成一条铅混合线，其斜率为0.1645，分别与地球铅平均演化线在2440×10^6 a和240×10^6 a处相交。

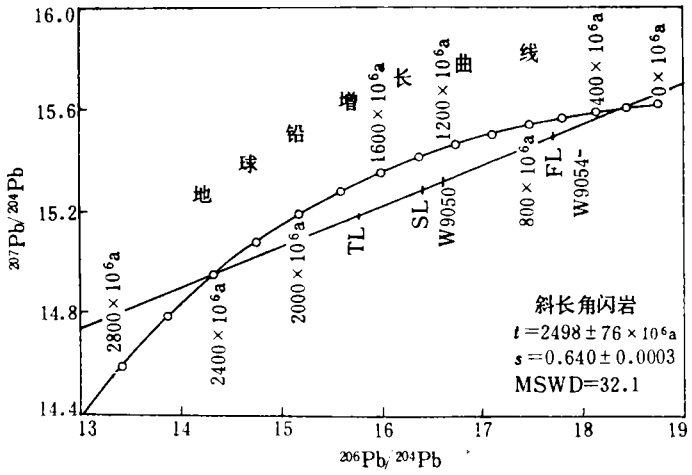

图 4 内蒙古乌拉山金矿区斜长角闪岩$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图

FL—第一阶段淋滤组分；SL—第二阶段淋滤组分；TL—第三阶段淋滤组分；S—斜率

Fig. 4. $^{207}Pb/^{204}Pb$ versus $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram of plagioclase amphibolite from the Wulashan gold ore district, Inner Mongolia.

FL—Leached components of the first stage; SL—Leached components of the second stage; TL—Leached components of the third stage; S—Slope.

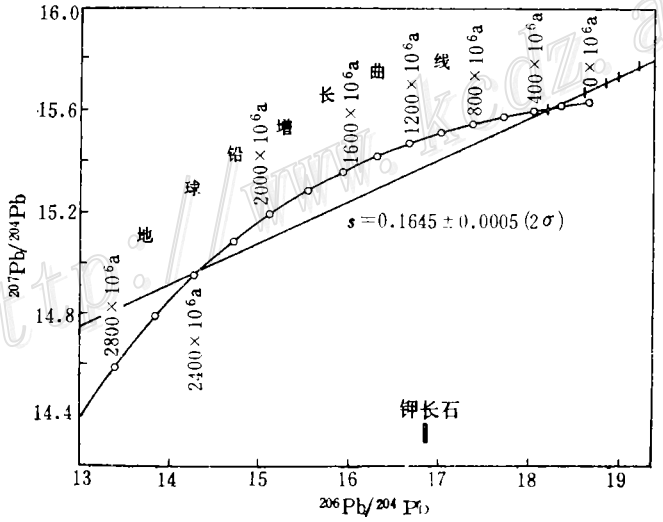

图 5 内蒙古乌拉山金矿区大桦背花岗岩体钾长石$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图

Fig. 5. $^{207}Pb/^{204}Pb$ versus $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram of K-feldspar from Dahuabei granite batholith, Inner Mongolia.

4.3 硫的来源

乌拉山金矿床含金脉体硫化物同太古代中温热液金矿床，在硫同位素组成方面存在明显差异。如美国马瑟洛德金矿床硫化物 $\delta^{34}S$ 值为$-0.5‰\sim+3.5‰$[5,11]，而乌拉山含金脉体为$-2.5‰\sim-13.5‰$。金矿床硫同位素研究结果表明：金矿床中$\delta^{34}S$小于$-3‰$的硫化物大都伴生有硫酸盐类矿物，因此，具低$\delta^{34}S$值的硫化物一般是在相对氧化条件下产出的(Phillips

等，1986)[9]。然而，在乌拉山含金脉体中，许多低$\delta^{34}S$值黄铁矿与毒砂、磁黄铁矿共生。上述二类矿物均是低f_{O_2}条件下的产物。样品W9023是从含黝铜矿和低铁闪锌矿，而缺失毒砂和磁黄铁矿的样品中分离出来的，其$\delta^{34}S$值与前述其它样品相似。如果硫化物$\delta^{34}S$值受热液流体-围岩反应过程中f_{O_2}控制，那么W9023值应明显高于其它与毒砂和磁黄铁矿共生的硫化物。这一推论与乌拉山实际情况并不相符，因此，我们认为：氧化-还原并非是控制含金脉体硫化物硫同位素组成变化的唯一因素。

中生代闪长玢岩和大桦背岩体黄铁矿的$\delta^{34}S$值同岩浆岩型硫化物相类似[8]，此外，在切割闪长玢岩的方解石-石英脉中，黄铁矿的$\delta^{34}S$值降低为+0.8‰。所有采自矽线-黑云片麻岩和角闪斜长片麻岩的黄铁矿均以富^{32}S为特点，其组成特征与在缺氧环境中，通过硫酸盐细菌还原反应形成的硫化物相似[9]。可以推测：金矿床形成过程中，乌拉山群变质岩层内存在一富^{32}S的硫源区。含金脉体硫化物硫同位素值介于变质岩地层与火成岩岩体之间，其变化

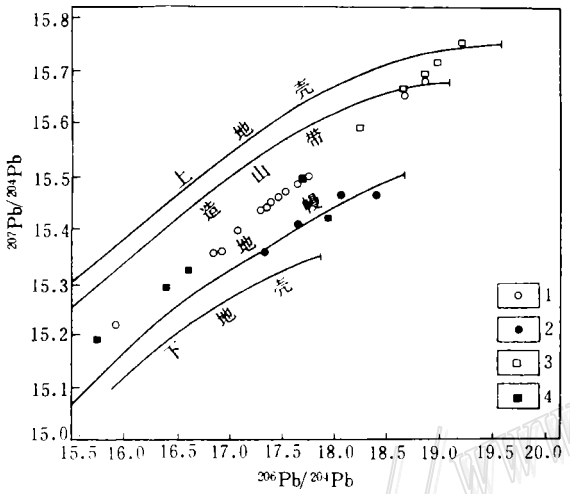

图 6 内蒙古乌拉山含金脉体硫化物、大桦背岩体钾长石和斜长角闪岩$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图

1—含金脉体A组黄铁矿和方铅矿；2—含金脉体B组黄铁矿；3—大桦背岩体钾长石；4—斜长角闪岩及其淋滤组分；底图引自Zartman和Haines(1988)[12]文献

Fig. 6. $^{207}Pb/^{204}Pb$ versus $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram of sulfides from auriferous veins, K-feldspar from Dahuabei granite batholith, and plagioclase amphibolite, the Wulashan ore district of Inner Mongolia.

1—Sulfides of Group A(pyrite and galena) from auriferous veins; 2—Sulfides of Group B(pyrite) from auriferous veins; 3—K-feldspar from Dahuabei granite batholith; 4—Plagioclase amphibolite and leached components.

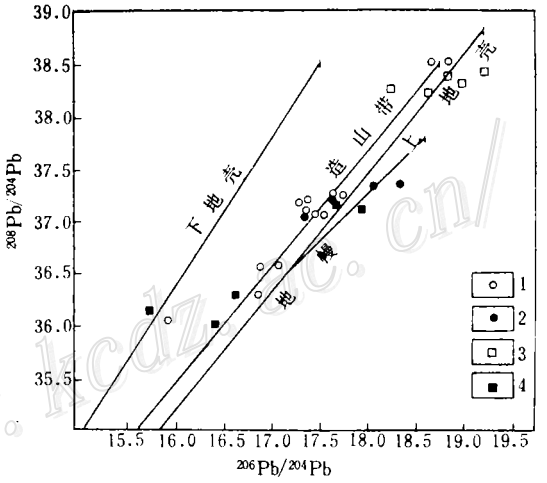

图 7 内蒙古乌拉山含金脉体硫化物，大桦背岩体钾长石和斜长角闪岩$^{208}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图

图例同图 6

Fig. 7. $^{208}Pb/^{204}Pb$ versus $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram of sulfides from auriferous veins, K-feldspar from Dahuabei granite batholith, and plagioclase amphibolite, the Wulashan ore district, Inner Mongolia.

Symbols as for Fig. 6.

特征表明：硫化物中的硫不可能仅来自大桦背岩体或变质岩地层。它们是含重硫岩浆热液与变质岩地层轻硫混合的产物。含金脉体中，同一硫化物铅、硫同位素数据的非相关关系，同样反映了它们在来源方面的差异。

4.4 铅、金和其它金属元素来源

在$^{207}Pb/^{204}Pb$对$^{206}Pb/^{204}Pb$图中（图6），A组硫化物、大桦背岩体钾长石和斜长角闪岩分别投绘在三个不同区段，并且构成一线性关系很好的“混合铅”带。钾长石铅数据构成该“带”的上段，斜长角闪岩位于下段，而A组硫化物铅数据介于二者之间，铅同位素数据的分布特征表明：这三类地质体具有相似的铅同位素初始比值和密切的成因联系。

斜长角闪岩的淋滤实验表明：同全岩样品相比，第一阶段易溶组分富含放射性成因铅，而第二、三阶段淋滤物的$^{207}Pb/^{204}Pb$比值相对较低，其中第三阶段铅同位素比值代表了化学和同位素上均未发生过分异的镁铁火山岩[1,3]。尽管目前人们对太古代地幔源铅同位素组成尚不十分了解，但是，我们认为：斜长角闪岩可能起源于低铅含量的幔源岩浆，成岩时代为（2498±76）$\times 10^6$ a。成岩期后岩浆热液活动造成岩石样品中铅丰度发生变化，致使铅同位素数据投绘点偏离（2498±76）$\times 10^6$ a Pb-Pb线。

大桦背岩体钾长石铅同位素数据投绘在地球铅平均演化线上方，并且构成铅混合线。这条Pb混合线与地球铅平均演化线分别在2400 $\times 10^6$ a和230 $\times 10^6$ a处相交，前者代表了岩体U-Th-Pb体系开始演化的时间，后者与岩体本身K-Ar年龄（217 $\times 10^6$ a）接近，反映了体系闭合的时间。我们认为：大桦背岩体是含镁铁质岩石的陆壳通过部分熔融和结晶分异形成的，岩体侵位可能发生在晚古生代。

含金脉体中A组硫化物同斜长角闪岩和大桦背岩体钾长石具有相似的铅初始比值，类似的铅同位素组成特征亦可在华北板块北缘冀东和张宣地区见到[1,2]。乌拉山金矿床形成过程中，晚古生代花岗岩类岩浆和前寒武纪幔源火山岩铅的混入是产生上述同位素特征的主导控制因素。因此，乌拉山金矿床成矿物质主要来自与大桦背岩体有关的成矿溶液及其对乌拉山群变质岩地层的淋滤。B组硫化物的铅同位素数据比较复杂，很难用一种简单的混合模式来解释。鉴于该组硫化物均采自强烈褐铁矿化和泥化的岩石，我们很难确定这两类热液蚀变作用及风化与铅同位素组成的关系。铅同位素研究结果表明：岩（矿）石的淋滤和风化作用均可造成铅发生不同程度丢失和分异，从而造成放射性成因铅含量的降低[4,6]。A、B组硫化物铅同位素比值的差异主要与原生硫化物的风化、淋滤作用有关。

4.5 成矿模式

为了详细讨论含金脉体、大桦背花岗岩和斜长角闪岩的成岩（矿）物质来源及其相互间成因联系，了解金矿区范围内构造-岩浆演化历史是十分必要的。如前所述，本区太古代和古元古代变质镁铁火山岩及有关沉积岩极为发育，并且是金矿床的重要容矿围岩。地质和地球物理研究结果表明❶：本区前寒武纪变质岩地层在元古代，沿阴山山前深断裂向北推覆，并且在晚古生代—早中生代再次活化。受这种推覆构造活动影响，区内岩石地层发生强烈变形和变质作用，构成区内今日所见复杂构造形迹。与此同时，断裂构造致使变质岩地层（含斜长角闪岩）部分熔融，从而形成花岗岩类岩浆。这种岩浆继承了斜长角闪岩铅同位素组成和金丰度，另一方面，受矿物分解和再结晶作用影响，岩浆热液中放射性成因铅将会不断积累。当上述热液流体进入围岩，不同来源硫、铅同位素交换反应即会发生，从而沉淀出具混合源硫和铅特点的硫化物。含金脉体是富放射性成因铅溶液与围岩相互作用的产物。

❶ 胡宝全、常忠耀、张文聪，1990，阴山（包头段）大型推覆构造基本特征及其与金矿区域成矿关系。内蒙古地质，第1期，第1～7页

5 结 论

（1）乌拉山含金脉体硫化物（黄铁矿和方铅矿）的$\delta^{34}S$值均为负值，变化范围较小。同上述硫化物相比，闪长玢岩和大桦背岩体以富^{32}S为特点，而太古界变质沉积岩的$\delta^{34}S$值可低至－18‰，含金脉体中的硫来源于岩浆热液与变质岩地层的混合作用。

（2）岩浆热液对变质岩地层的淋滤是金矿脉形成的重要控制因素，成矿热液主要来自大桦背花岗岩及有关脉岩。成矿期后，强烈的风化作用对原生硫化物硫和铅同位素体系具有一定影响，从而形成B组硫化物。

（3）斜长角闪岩淋滤实验表明：第三阶段淋滤组分代表了化学和同位素上未发生过分异的镁铁质火山岩，其铅同位素比值反映了岩体U-Th-Pb体系的初始同位素组成。样品W9050及其淋滤组分的Pb-Pb等时线年龄为（2498±76）×10^6 a，暗示了岩体的形成时代。大桦背花岗岩体钾长石铅混合线与斜长角闪岩Pb-Pb线相互重叠，结合岩体其它地质特征，推测：岩体起源于变质岩的重熔和岩浆结晶分异作用。

（4）含金脉体中同一硫化物铅和硫同位素数据之间并不存在任何相关关系，这种非相关性同样反映了铅和硫及有关组分来自混合源。

研究工作是本文第一作者在挪威奥斯陆大学从事博士后研究期间完成的。野外地质工作得到内蒙古地矿局地研队张建生、雷瑞英，一〇五地质队郎殿有，武警黄金指挥部十一支队郭砚田等同仁的帮助，室内研究得到Toril Enger女士，Arne Stable和Tom Anderson先生协助，图件由矿床地质研究所王新清女士清绘。武警黄金指挥部赵礼高级工程师曾对本文提出宝贵意见，对此，笔者谨表衷心感谢。

参 考 文 献

1 林尔为等.冀东金矿集中区的铅同位素研究.长春地质学院学报，1985,(4)：1～10

2 王郁等.河北省张宣地区金矿床铅同位素地质特征.地质找矿论丛，1990,5（2）:66～75

3 Birkeland A. Pb-isotope analysis of sulfides and K-feldspars, a short introduction to analytical techniques and evaluation of results. Internal Bulletin series, 1990, (15):1～30

4 Bjorlykke A, Thorpe R I. The source of lead in the Osen sandstone lead deposit on the Baltic Shield, Norway. Econ. Geol., 1981, 77:430～440

5 Bohlke J K, Coveney R M Jr, Rye R O, Barnes I. Stable isotope investigations of gold quartz veins at the Oriental mine, Alleghang district, Carlifornia. U S Geollogical Survey Open File Report, 1988,88～279,24p

6 Doe B R, Delevaux M. H. Source of lead in Southeast Missouri galena ores. Econ. Geol., 1972,67:409～425

7 Ludwig K R. A plotting and regression program for radiogenic isotope data for IBM-PC compatible computer, Version 2.11.U.S.Geological Survey Open File Report, 1990, 85～557

8 Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon, In:Barnes H L. ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed., New York, Wiley Interscience, 1979,509～567

9 Phillips G N, Groves D I, Neall F B, Donnelly T H, Lambert I B. Anomalous sulfur isotope composition in the Golden Mile, Kaloorlie. Econ. Geol. 1986, 81:2008～2015

10 Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model.

Earth and Planet Sci. Lett., 1975, 36:207～221

11 Taylor B E. Stable isotope geochemistry of ore-forming fluid. Miner. Assoc. Canada: Short Course Handbook, 1987, 13:337～445

12 Zartman R E, Haines S M. The plumbotectonic model for Pb isotope systematics among major terrestrial reservoir-A case for bi-directional transport. Geochim. Cosmochim. Acta, 1988, 52:1327～1339

LEAD AND SULFUR ISOTOPE STUDIES OF THE WULASHAN K-FELDSPAR AND QUARTZ VEIN GOLD DEPOSIT, SOUTHWESTERN INNER MONGOLIA

Nie Fengjun, Pei Rongfu, Wu Liangshi and Zhang Hongtao

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Arne Bjorlykke

(Department of Geology, University of Oslo, Norway)

Key words: Wulashan of Inner Mongolia, gold deposit, sulfur and lead isotopes, genesis of the ore deposit

Abstract

The newly discovered Wulashan K-feldspar-quartz and quartz vein gold deposit is located within Late Archean metamorphosed volcano-sedimentary sequences of Wulashan Group, and surrounded by a number of Late Paleozoic granitoid dikes and batholiths in southestern Inner Mongoiia. Sulfur isotope analyses of twenty-one sulfide (galena and pyrite) samples from auriferous K-feldspar-quartz and quartz veins, plagioclase amphibolite, gneiss and granitoid intrusions in the Wulashan area reveal that sulfur of the ore-bearing fluids was mainly derived from a mixed source of Late Paleozoic igneous and Archean metamorphosed volcano-sedimentary rocks. Lead isotope data on plagioclase amphibolite define a correlation line with the slope corresponding to an age of 2498±76 Ma. In contrast, K-feldspar of the Dahuabei granitoid batholith is characterized by high content of radiogenic lead. On the plot, lead isotope data points of thirteen separated galena and pyrite samples from the auriferous vein system fall between the area of plagioclase amphibolite and that of Dahuabei granitoid batholith, and constitute a mixing line. The result of lead isotope study also indicates that Late Archean supracrustal rocks were the initial lead source for Dahuabei granitoid batholith, auriferous K-feldspar-quartz veins and quartz veins. Both sulfur and lead isotope data show that lead, gold and other metal elements of the auirferous vein system mainly came from a mixed source of Archean metamorphosed volcano-sedimentary rocks and Late Paleozoic Dahuabei granitoid batholith which was probably derived from homogenized re-melting of previously formed supracrustal rocks during Late Paleozoic tectonic events.