

中国北方金矿床铅同位素研究

贾叶飞 李霞

(长春地质学院, 长春)

摘要: 本文着重讨论了我国北方地区几个主要金矿床的形成时代、矿源及其与铅同位素的关系。认为: ①从内蒙到东部沿海(包括东北), 金矿的形成时代从海西中期(311×10^6 a)到燕山晚期(100×10^6 a), 并且大多数金矿与中生代的岩浆活动有关; ②在由岩石铅(包括花岗岩和变质岩)和矿石铅同位素组成的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上, 矿石铅同位素组成更靠近花岗岩一端; ③变质岩和花岗岩中的金具有很高的淋洗率, 均可作为金矿的矿源岩石。

关键词: 金矿床 铅同位素 矿源岩石 中国北方

金是不活泼的化学元素。天然金只有一个同位素, 因此金矿床的同位素地质研究实际上是利用其它元素的同位素对金矿床的成矿作用进行示踪研究。近十多年来, 金矿的同位素工作经历了一个飞跃的发展, 几乎全部金矿都作过同位素探讨, 使同位素研究成为金矿成因探讨的主要内容。当然金矿成因涉及到矿床学的一些基本问题, 同位素地质研究的焦点实质上也在于此。本文重点对金矿床的铅同位素研究作一探讨, 并期待对金矿的找矿有一定的指导意义。

1 北方金矿的成矿时代

从整体来看, 华北西部金矿形成时代较老, 东部沿海较新。这种特点与苏联东部的情况相似。现具体介绍几个典型金矿床的成矿时代。

1.1 内蒙十八顷壕金矿(包头北40 km)

含金石英脉赋存于元古界五分子群变质岩的韧性剪切带中, 矿床围岩的锆石 U-Pb 年龄为 2043×10^6 a, 下交点年龄为 322×10^6 a, 后者或许是发生韧性剪切作用的时代。含矿石英脉中的黑云母 K-Ar 年龄为 281.5×10^6 a, 蚀变闪长岩的全岩 K-Ar 年龄亦为 281.5×10^6 a, 利用石英脉中的黑云母、黄铁矿、石英和方解石作 Rb/Sr 年龄测定, 成矿年龄在 $(289 \sim 311) \times 10^6$ a 之间, 大体上与 K-Ar 年龄相一致。因此可以说内蒙有一次海西中期的成矿作用。

白云鄂博铁矿外圈的赛因乌素金矿、包头以北乌拉山中的乌兰布郎金矿虽未取得直接的测定数据, 但据地质条件判断也应归属于海西期。

1.2 张家口金矿(小营盘)

小营盘金矿的主矿体是单一的一条含矿石英脉, 赋存于桑干群(现改为阜平群)一套麻粒岩相角闪岩质片麻岩中, 矿区北部出露燕山期黑云母花岗岩体(谷咀子岩体); 其全岩 Rb-Sr 等时年龄为 $(184 \pm 24) \times 10^6$ a。一条近南北向断层切穿谷咀子岩体, 岩体内有微弱金矿化, 断层的南部沿断层两侧形成含金石英脉。据河北地矿局地质三队的研究, 断层两侧的含金石英脉形成温度为 380°C , 远离断层 1 km, 成矿温度降为 280°C , 也就是说每 10 m 降温 1°C 。这是一项证据, 说明热源来自谷咀子岩体, 成矿年龄可能和岩体的年龄基本一致, 应属于燕山早期。

1.3 金厂峪金矿

金厂峪金矿的围岩是斜长角闪岩, 岩石的 Pb-Pb 年龄为 3268×10^6 a, 含矿钠长石石英脉沿糜棱岩产出,

蚀变岩(绢云母片岩)的K-Ar全岩年龄为 197.1×10^6 a,矿区西北侧出露黑云母花岗岩(青山口岩体)的黑云母K-Ar年龄为 195.6×10^6 a,全岩Rb-Sr等时线年龄为 $(200 \pm 1) \times 10^6$ a,和矿体蚀变岩的K-Ar年龄基本一致。因此可以认为金厂峪金矿的成矿年龄为印支期。

1.4 胶东金矿

胶东金矿主要产于玲珑花岗岩和郭家岭花岗岩体内部,或岩体与胶东群变质岩的内外接触带内。早期的全部K-Ar年龄数据都说明岩体的形成时代属于燕山期。近几年来由于测试技术水平的提高,又获得一批高质量的测定结果,胡世玲(1986)首先用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定了玲珑和郭家岭两岩体的年龄谱,前者的坪年龄为 $(164 \pm 0.6) \times 10^6$ a。此后一些成功的Rb-Sr年龄,锆石U-Pb测定都表明胡世玲的数据是可靠的和可信的。一般认为成矿作用与郭家岭花岗岩更为密切,成矿作用应略晚于 134.9×10^6 a,属燕山中晚期。蚀变岩中绢云母的Rb-Sr等时线年龄比较年青,说明成矿作用与花岗岩的侵入存在数千万年的滞后。

1.5 团结沟金矿

团结沟金矿产于超浅成石英斑岩与黑龙江群二云母片麻岩的接触带中,且蚀变的斑岩体和变质岩的蚀变岩中都有矿石产出,石英斑岩的黑云母K-Ar年龄为 100×10^6 a,黑龙江群蚀变岩中的黑云母K-Ar年龄为 102×10^6 a。其它一些单位也作过年龄测试,但数据都不超过 110×10^6 a。可见矿化时代应为 110×10^6 a左右,介于上下白垩世之间,属燕山晚期。

黑龙江群是一套构造岩,原为一套海相慢源火山物质为主的沉积建造,经推覆作用发生糜棱岩化形成一套富钠质的二云母钠长糜棱岩。岩石的Rb-Sr等时年龄为 $(414.7 \pm 17.3) \times 10^6$ a,代表糜棱岩化作用的年代,锶初始比值为 0.7027 ± 0.0059 。

岩石受大面积印支期岩浆活动的扰动,局部全岩Rb-Sr等时年龄降为 $(218.66 \pm 19.90) \times 10^6$ a,锶初始比值略有提高为 0.7049 ± 0.0010 。黑龙江群的锆石U-Pb年龄为 $(445.34 \pm 18.39) \times 10^6$ a,也属于推覆作用的年龄。

1.6 五龙金矿(辽宁丹东)

五龙含金石英脉金矿产于片麻状花岗岩中,早期被定为混合花岗岩,现已否定。据辽宁冶金107队的资料,年龄大于 110×10^6 a的岩脉已经矿化,而年龄小于 90×10^6 a的岩脉未经蚀变。因此估计矿化时代应在 100×10^6 a左右,与团结沟金矿矿化的年龄大体一致。

1.7 吉林海沟金矿

海沟金矿是吉林桦甸金矿集中区一个典型矿床。刘裕庆(1991)的资料,铅为两阶段演化的古老均一铅,变质年龄为 2398×10^6 a,下交点为 $181 \times 10^6 \sim 142 \times 10^6$ a,其 $181 \times 10^6 \sim 142 \times 10^6$ a正是岩体和矿石的形成年龄,也应属于燕山期。

从上述这些资料来看,从内蒙到东部沿海(包括东北)地区,金矿化年龄大体上是从海西中期到印支期,最后到燕山中晚期,并且金矿的形成大都和中生代的中酸性岩浆活动的有直接关系。苏联的远东沿海金矿年龄更晚,属于第三纪。对照南岭花岗岩时间演化,情况大体类似,其时间演化也是由西向东由老到新。

据现有的资料分析,华北及东北地区还没有一个大型金矿床,从年代学的角度提供古老成矿的直接证据,已知的金矿都是古生代或中生代地台活化的产物,并且以中生代为主。

2 北方金矿的铅同位素

中国的岩石铅和矿石铅同位素组成具有鲜明的区域性特点。据朱炳泉、张理刚等研究各地区铅同位素组成与中国大陆的构造格局几乎完全吻合。华南的铅同位素比较富放射成因铅,完全没有古老下地壳的烙印,而华北陆台的铅同位素明显受下地壳铀亏损的影响,贫铀铅(^{206}Pb 和 ^{207}Pb)相对富钍铅(^{208}Pb),黑龙江地区的铅同位素与华南相似。从初始锶同位素比值来看,华南与北方的花岗岩也明显不一样,北方地区花岗岩的初始锶同位素比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)一般都介于 $0.702 \sim 0.710$,且90%的数据都小于 0.710 ,而华南地区的花岗岩初始锶同位素比值一般介于 $0.704 \sim 0.740$,且80%的数据都大于 0.710 。

北方金矿的铅同位素一般具有三个基本特征:①从表面上看,它们的单阶段模式年龄较古老,一般都

大于成矿年龄, ②各金矿集中区的矿床和矿点的铅同位素组成差别很大, 同时在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上成线性分布, ③在同一矿床内部, 铅同位素组成相当均一, 或者变化微小, 方铅矿和其它硫化物的铅同位素组成完全相同。现结合具体矿床, 就这些特点作一讨论。

2.1 燕山地区

冀东金矿(20个矿点)的铅同位素呈线性分布, 变质岩与花岗岩(青山口岩体)的长石和矿石铅同落在一条线上, 矿石铅的单阶段模式年龄大于14亿年, 远较成矿年龄老, 或者说矿石铅中放射成因铅很低。

冀东地区大面积出露下地壳岩石, 即麻粒岩相和角闪岩相岩石, 普遍遭受25亿年前的变质作用, 变质作用的结果是岩石中的U、Th和Rb等元素向上地壳转移, 引起岩石中明显的铀亏损, μ 值(即 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)下降。经历25亿年以后, 岩石中放射成因铅的积累比较少, 从岩石中浸提出来的铅显示铀亏损特征。这是一种多阶段铅, 变质事件是铅演化的第一阶段, 其后至成矿又是另一个阶段, 这种铅不可能用单阶段模式来计算年龄。铅同位素的线性展布可以用混合模式或两阶段模型加以解释。考虑到花岗岩、变质岩及矿石铅同位素同落在一条线上, 并且花岗岩和变质岩的铅同位素正好处于两个端元, 我们设想矿石铅是变质岩与花岗岩铅的混合物, 混合模型的数学表达式为:

$$m = \frac{^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}} = \frac{1(e^{\lambda_5 t_1} - e^{\lambda_5 t_2})}{137.88(e^{\lambda_6 t_1} - e^{\lambda_6 t_2})}$$

m 为混合线的斜率, t_1 代表变质岩的年龄, t_2 代表花岗岩的年龄或成矿年龄。如果 t_2 成矿年龄为已知则可求出 t_1 , 反之亦然。设冀东地区的成矿年龄为 $200 \times 10^6 \text{a}$, 代入上述公式则可求出变质岩的年龄为 3334×10^6 , 与斜长角闪岩的Pb-Pb等时年龄基本一致。

如果把冀东的铅同位素与张家口地区的铅同位素统一考虑, 计算出的变质年龄为 $2602 \times 10^6 \text{a}$ 。一般来说, 用混合模型作年龄计算, 精度不很高, 但作为一种模型假设的检验还是可信的。

燕山地区的铅同样还可以作两阶段模型处理, 模型的数学表达式与混合模型的表达式完全相同, 其表达式为:

$$S = \frac{1 \cdot (e^{\lambda_5 t_1} - e^{\lambda_5 t_2})}{137.88(e^{\lambda_6 t_1} - e^{\lambda_6 t_2})}$$

S 代表两阶段等时线的斜率, t_1 代表第一阶段即变质作用年龄, t_2 代表第二阶段演化即成矿年龄。我们倾向采用两阶段模型, 因为花岗岩、变质岩及矿床的铅同位素同落在一条线上, 这种巧合的可能性不大。

铅同位素提供的另一个信息是, 大中型金矿的铅同位素一般更靠近花岗岩这一端, 表明其铅主要来源于花岗岩, 或者说花岗岩的影响强度越高, 金矿的规模就越大。当然成矿作用还有其它必要的条件。

2.2 内蒙地区

内蒙十八顷壕、乌兰布郎、白云鄂博金矿的铅同位素都成线性分布。以矿区邻近的花岗岩类作为一个端元, 并把当地的变质岩的平均铅同位素组成作为另一端元, 经计算矿石中的铅的来源由花岗岩类提供的比例, 其上述三个矿床分别为78%、73%和44%。

2.3 胶东地区

胶东金矿的铅同位素也呈线性分布, 但产于花岗岩中的各主要矿床铅同位素组成非常均一, 并且与花岗岩的铅同位素组成相当一致, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.2$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.9$ 。单阶段模式年龄在8亿年左右, 也属于异常铅。胶东群的铅同位素也显示强烈的铀亏损, 但亏损程度(或变质程度)低于冀东地区的迁西群, 花岗岩的铅同位素说明它本身至少部分地来自上地壳下部, 或下地壳古老岩石是变质岩的部分重熔产物。

从胶东地区、燕山地区和内蒙地区相比, 可以说胶东大型金矿中的铅全部或绝大部分来源于燕山期的花岗岩, 内蒙和燕山地区金矿的铅有一定比例的变质岩岩石铅的混入。

3 金矿矿源与金矿

研究金矿的成因必然涉及到其矿源问题, 许多学者认为矿源与变质岩有关, 即变质岩中金的丰度很高,

或者变质岩中金的可溶性较高,或者铁镁质岩石对硫同时对金具有较高的捕获能力。从目前国内有些资料看,变质岩中金含量非常高(达ppm级),但事实上,变质岩中金的含量仅略高于地壳的克拉克值,有些样品甚至低于克拉克值。因此变质岩能否作为金矿的矿源岩石,应首先取决于其含金元素在热液流体中的可溶性。对花岗岩也是一样,岩浆活动不仅仅是提供成矿的流体,有可能是金矿源的一部分。为此有必要对岩石中金的淋洗实验作一研究。

3.1 常温常压下的淋洗实验

取金厂峪矿区及外围有关岩石,经破碎(200目以下)分别对同一样品作逆王水溶矿及氢氟酸溶矿,然后用原子吸收光谱对溶液作Au的含量分析。氢氟酸溶矿可将样品彻底分解,所测结果即岩石的金含量。但逆王水溶矿,主要是角闪石、黑云母等暗色矿物被溶解,大部分石英和长石被残留下来,因此溶液中的金仅代表可溶矿物中的金。实验结果如表1。

表1 岩石中金的易溶性实验结果

Table 1. Experimental data on solubility of gold in rocks

样号	岩石名称	Au(10^{-9})	
		逆王水溶样	氢氟酸溶样
B52	中细粒花岗岩	1	4
B49	中粗粒花岗岩	1	8
B50	粗粒花岗岩	1	5
B53	花岗细晶岩(脉岩)	4	12
B59	黑云母闪长岩(脉岩)	1	77
B55	花岗斑岩(脉岩)	1	1
B01	斜长角闪岩	1	1
B13	斜长透辉角闪岩	1	1
B02	斜长角闪岩	1	1
B14	斜长透辉角闪岩	1	2
B04	斜长角闪岩	1	1
B05	斜长角闪岩	1	1
B12	石榴斜长角闪岩	1	2

(据高占林、林尔为,1988)

从表1可以看出青山口花岗岩和矿区的脉岩普遍具有很高的金含量,但可溶比例很小,各种变质岩的金含量很低,但可溶部分的比例很高。这说明暗色矿物是金的主要载体,火成岩中的金可能大部分在石英长石之中。

3.2 高温高压下的淋洗实验

利用0.25 mol/L NaHS + 0.75 mol/L NaCl作为淋洗母液($\text{pH}_{25^\circ\text{C}} = 8.35$),在温度450~100℃(间隔50℃)、压力5MPa、50MPa条件下,对三组岩石样品(碎至200目以下)进行研究,其中火成岩为一组由玲珑花岗岩、河北灵寿马棚花岗岩和黑龙江罗北花岗斑岩组成,金的平均含量为 3.18×10^{-9} ;第二组为变质岩包括阜平群斜长角闪岩和黑龙江群黑云母斜长片麻岩,金的平均含量为 3.86×10^{-9} ;第三组为沉积岩包括大同石炭纪页岩、铜川泥岩和长春羊草沟侏罗纪煤系中的细砂岩,金的平均含量为 8.85×10^{-9} 。以上三组样品是彻底无矿化的。样品用石英管封闭,在高压釜中对岩石中的金进行提取,液相经化学处理测定金的总量,其总量与原始样品中金的总量相比计算出金的浸出率,实验结果如表2(所有金含量分析均采用中子活化方法)。

从表2中可以看到,变质岩和火成岩样品在450℃、50MPa、弱碱性的流体中,金的浸出率在14%~15%之间,而沉积岩中金的浸出率仅0.7%,所以对实验的火成岩和变质岩来说,其金的浸出率对成矿作用已相当可观,它们均可作为金矿的矿源岩石。

表 2 高温高压下岩石中金淋洗实验结果

Table 2. Experimental data on leaching of gold from rocks at elevated temperature and pressure

条 件	火成岩		变质岩		沉积岩	
	金浸出量 (10^{-9})	金浸出率	金浸出量 (10^{-9})	金浸出率	金浸出量 (10^{-9})	金浸出率
100℃ 5Mpa 48 h	0.050 (27)	0.0078	0.079 (17)	0.0101	0.042 (30)	0.0024
150℃ 5Mpa 48 h	0.069 (21)	0.0107	0.101 (17)	0.0129	0.055 (25)	0.0031
200℃ 5Mpa 48 h	0.131 (13)	0.0202	0.411 (11)	0.0505	0.067 (8)	0.0038
250℃ 5Mpa 48 h	0.352 (15)	0.0524	0.512 (5)	0.0622	0.081 (5)	0.0046
300℃ 50Mpa 36 h	0.655 (10)	0.0934	0.912 (7)	0.1057	0.075 (9)	0.0042
350℃ 50Mpa 36 h	0.914 (5)	0.1257	1.050 (6)	0.1197	0.112 (8)	0.0063
400℃ 50Mpa 36 h	1.030 (12)	0.1394	1.210 (14)	0.1355	0.120 (11)	0.0067
450℃ 50Mpa 36 h	1.100 (9)	0.1475	1.260 (7)	0.1403	0.124 (9)	0.0070

注: () 为分析的百分误差

对实验样品进行电子显微镜能谱仪扫描观察证实, 变质岩和火成岩中的金呈微粒(原子态或离子态暂时无法确定) 散布于磁铁矿、角闪石、黑云母和绿泥石中, 而石英砂岩(羊草沟) 中的金全部分散在石英颗粒中。因此可以设想, 晶格中的金只有使晶格破坏时才有可能溶解于热液流体中, 而变质作用引起沉积岩、火成岩中的金再分配, 使金从石英晶体中分离出来进入暗色矿物。这样变质岩遭受热液流体淋洗时, 金被溶解沿导矿构造迁移, 当环境条件(Eh、pH、 f_{O_2} 等) 改变时, 富集沉淀于容矿空间而成矿。

4 结论和讨论

1 从我国北方(包括东北)地区金矿床形成时代来看, 从内蒙到东部沿海, 金矿化年龄大体是从海西中期到燕山中晚期, 并且多数与中生代中酸性岩浆活动有直接关系。从年代学角度考虑, 还没有一个内生的金矿与古老成矿作用有关的证据。

2 我国北方的金矿床: 其铅同位素一般更靠近花岗岩一端, 说明金矿床中的铅主要来自花岗岩, 花岗岩离金矿越近, 影响程度越高, 金矿的规模就变大。当然还须考虑其它地质条件。

3 从岩石中金淋洗实验结果说明, 变质岩和花岗岩对金矿的形成都是不可缺少的条件, 它们中金的浸出率很高, 均可作为金矿的矿源岩石。

当然金矿的形成并不是一次地质事件的结果, 而是多期多阶段地质作用的产物。金矿的同位素地质研究, 首先要以基本的地质控矿条件为基础, 这样才有可能更全面、更深刻地揭示出金矿的成因。另外本文其它稳定同位素方面的资料在此没有涉及, 文中可能有不少错误由衷地希望同行们批评指正。

本文完成过程中, 得到林尔为教授的多方面指导, 并提供了许多资料, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 王义文. 我国主要类型金矿床同位素地质学研究. 地质论评, 1982 (2)

- 2 王义文. 胶东西北部地区金矿铅同位素特征. 长春地质学院学报, 1988, (3)
- 3 林尔为, 郭裕嘉. 冀东金矿集中区的铅同位素研究. 长春地质学院学报, 1985, (3)
- 4 汪东波. 金在热液中的迁移形式. 地质科技情报, 1988, (3)
- 5 申浩澈. 中国花岗岩锆同位素组成的基本特征及研究意义. 长春地质学院学报, 1990, (2)
- 6 刘裕庆. 吉林海沟金矿床同位素地球化学和成矿规律研究. 矿床地质, 1991, (2)
- 7 徐雁军等. 内蒙包头—白云鄂博地区金矿的同位素研究. 长春地质学院学报, 1992, (2)
- 8 王正坤等. 张宣地区小营盘、东坪金矿的地质地球化学对比. 地质与勘探, 1992, (1)
- 9 林尔为, 贾叶飞. 岩石中金和铅在热液流体中的浸出实验研究. 长春地质学院学报, 1992, (1)
- 10 Seward T W. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37: 379~399
- 11 Lambert R S I. Lead isotopes in Archean rocks and the evolution of the mantle. *Geological Association of Canada*, 1985, 28: 49~53
- 12 Barrett T J, Anderson G M. The solubility of sphalerite and galena in 1—5 m NaCl solutions to 300°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 152: 813~820

LEAD ISOTOPE STUDIES OF GOLD DEPOSITS IN NORTH CHINA

Jia Yiefei and Li Xia

(Institute of Ore Deposits, Changchun College of Geology, Changchun, Jilin province)

Abstract

The present paper summarizes geological features of some major gold deposits in North China and their mineralization ages from the angle of geochronology. These gold deposits are mostly hosted by various old metamorphic rocks and are closely related to the Mesozoic intermediate-acid intrusions. Their mineralization ages appear to become younger from 311 Ma in the west (Inner Mongolia) to 100 Ma in the east (coastal areas of East and Northeast China). The lead isotope composition of the ores and that of host rocks lie on the same line in the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram, with the lead isotope composition of granites and that of metamorphic rocks just occupying the two end members. Thus a mixed or two-stage evolutionary model of lead isotopes is advanced in this paper. It is concluded that the gold deposits have a genetic connection with granites and metamorphic rocks. Lead in the ores came from these two types of host rocks and the sizes of the ore deposits are directly proportional to the amount of lead provided by the related granites. Experiments under the conditions of 450—100°C (with an interval of 50°C) and $50 \times 10^5 \text{ Pa}$ and $100 \times 10^5 \text{ Pa}$ were conducted to examine the leaching ratios of Au in different rocks of North China, which commonly host gold deposits. The results show that the leaching ratios of Au in the metamorphic, igneous and sedimentary rocks are 14.75%, 14.03% and 0.7% respectively, indicating convincingly that igneous and metamorphic rocks serve as the source rocks of Au and are closely related to the formation of gold deposits in North China.