

综合述评

我国金矿床同位素地质研究的新进展

New Advances in Isotopic Geologic Studies of
Gold Deposits in China

蒋少涌 (Jiang Shaoyong)

(中国地质科学院矿床地质研究所)

近年来,随着我国黄金地质研究蓬勃开展,金矿床的同位素地质研究工作也有了较大进展。据不完全统计,目前国内已积累了二百多个金矿床的二千五百多个硫同位素数据,近一百个金矿床的四百多个矿石铅同位素数据,三十多个金矿床的二百多个氢氧碳同位素数据及大量的同位素年龄数据。这些成果在金矿地质研究工作中发挥了一定的作用。为了更好地总结经验、交流成果、发挥同位素地质研究的优势,1987年10月中旬在长春召开了“首届中国金矿床同位素地质学术讨论会”,从讨论会上可以看出我国金矿床同位素地质研究的进展情况。

一、金矿床稳定同位素的区域性对比研究

近年来,金矿床稳定同位素研究已由对单一矿床的研究发展为对整个成矿带、矿化集中区、甚至更大区域的综合对比研究。如小秦岭、胶东、冀东、辽东、夹皮沟等金矿化集中区的同位素研究较为深入。姚凤良教授等(1983, 1987)^[1]根据控矿地质条件和金矿化特征提出金矿成矿与岩浆热液关系密切,并认为它们具有统一的模式。蒋少涌(1987)通过对胶辽地区金矿床稳定同位素组成特征对比也得出成矿热液起源于岩浆,成矿作用演化过程大体相近的结论。范书魁等(1987)对比了中国北方五大金矿区的铅同位素组成提出了铅同位素三阶段演化模式,同样认为金的成矿与中生代花岗岩岩浆活动有关。

王义文(1982, 1985, 1987)^[2]全面总结了我国金矿床的稳定同位素地球化学特征。根据沉积变质、热水溶滤、变质热液、混合岩化热液、重熔同熔岩浆热液等不同金矿床类型,论述了其硫、铅、氧、氢和碳同位素组成特征,得出许多规律性认识。他还根据我国大多数金矿床既与地层密切相关(层控性),又与中生代花岗岩岩体有成因联系的事实,提出了它们属于与中生代花岗岩浆活动有关的层控金矿床的新观点。

二、金矿床矿石铅同位素研究

目前许多研究者在研究矿石铅同位素组成和演化时,已采用(扎特曼)Zartman的显生宙铅构造模型和 μ 值演化图来探讨金矿物质来源及成矿环境。朱炳泉等(1986)提出了铅同位素的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 图解,据此可以区分不同成矿地质环境。

铅同位素的研究对象也并不局限于矿石铅,对矿区内花岗岩、变质岩、伟晶岩的岩石铅和岩体(或地层)中方铅矿、黄铁矿也开展了大量铅同位素研究,得出许多重要结论:①许多金矿床矿石铅模式年龄既不同于地层沉积(或变质)年龄,也不同于花岗岩体侵入年龄,而是位于其间(胡小蝶、李兆龙、高百林等,1987;王义文,1985;栾世伟等,1985)。例如胶东半岛,产于混合花岗岩中的金矿床铅同位素组成很一致,模式年龄多为6—9亿年;产于胶东群变质岩系中的金矿床铅同位素组成变化范围稍大且呈线性排列,模式年龄为10—13亿年。而玲珑花岗岩黑云母K-Ar年龄为130Ma(王义文,1985)。②许多金矿区附近的花岗岩体侵位时代虽然较新(中生代),但其长石铅的模式年龄则很老。如金厂峪金矿,附近的青山口岩体K-Ar年龄为195.6Ma,而其长石铅模式年龄为1400Ma(林尔为等,1985)。这一现象在中国北方几大金矿化集中区相当常见。它为岩体重熔成因提供了依据,并解释了华北地台北缘燕山期花岗岩与金矿化的密

切关系,即花岗岩的含金性受区域潜在含金性的制约,而重熔作用是造成花岗岩继承古老地层含金性的重要机制之一。林尔为教授认为,轴亏损是华北陆台太古宙变质岩的一个区域性地球化学特征,而这些花岗岩体是太古宙地壳局部重熔形成的岩浆产物。③许多金矿区的花岗岩、矿石和变质岩铅同位素投影点在图解上排列成一条直线。一般将这条线看成是铅的两阶段等时线或花岗岩铅与变质岩铅的混合线。尽管这两者在概念上有所区别,但数学表达却完全相同:

$$R = \frac{1}{137.88} \left(\frac{e^{\lambda_5 t_1} - e^{\lambda_5 t_2}}{e^{\lambda_8 t_1} - e^{\lambda_8 t_2}} \right)$$

式中R代表等时线或混合线之斜率, t_1 代表第一阶段铅铀体系定位时间, t_2 代表矿化年龄。

例如金厂峪金矿,根据矿床围岩绢云母片岩的K-Ar年龄取197.1Ma作为矿化年龄(t_2),计算出 $t_1 = 3334$ Ma(图1)。这一结果与斜长角闪岩的铅-铅年龄3268Ma相当吻合(林尔为等,1985)。④利用铅同位素组成特征,可以区分“重熔”和“同熔”型花岗岩(图2)。重熔型花岗岩位于所在地区古老变质岩岩石铅和矿石铅范围内,模式年龄较老, $t = 6-21$ 亿年。而同熔型花岗岩则位于太平洋西岸岛弧铅范围内,模式年龄为0-3亿年,在误差范围内与其成矿母岩K-Ar年龄一致(王义文,1982,1985,1987)^{②③}。

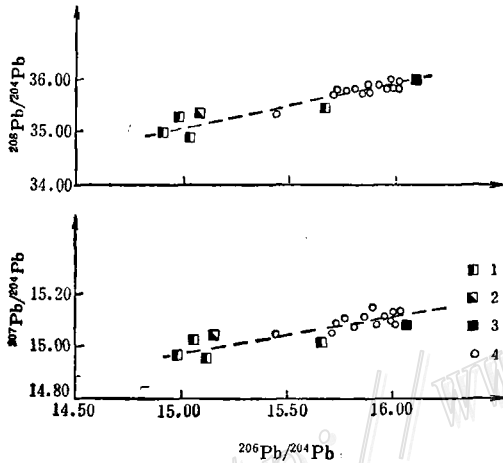


图1 金厂峪金矿床岩石及矿石铅同位素组成图解
(据林尔为等,1985)

1—斜长角闪岩; 2—混合岩; 3—青山口花岗岩; 4—矿石

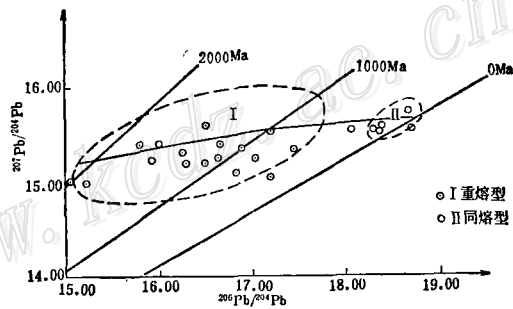


图2 重熔和同熔岩浆热液金矿床的铅同位素组成
(据王义文,1985,1987)

金在自然界只有一个同位素 Au^{197} , 而金矿床中普遍伴生有铅矿物,故可将铅同位素作为示踪剂。研究表明,几乎所有金矿床都有铅的分散晕,金在热液中的行为与铅是一致的。铅与金具有相关性和成矿演化的一致性。因此铅同位素的示踪价值很高,可以为解决金矿床复杂的成因机制和成矿作用的演化历史提供依据。

石英是金矿床中最常见的脉石矿物。张志兰等曾对石英中微量铅同位素进行了测试,用来更精确地“示踪”金成矿过程和揭示成矿特征,取得了一定成果^④。她们对广东河台金矿含金硅化岩的铅同位素分析表明, $^{206}Pb/^{204}Pb$ 为18.248—19.188, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 为15.559—15.760, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 为38.138—39.477。在坐标图上构成一条异常铅线与单阶段铅演化线相交的二次等时线,交点年龄分别是 $t_2 = 1.71$ 亿年, $t_1 \approx 24$ 亿年,而由矿床中黄铁矿、黄铜矿铅同位素组成的一条异常铅线,其 $t_2 = 1.5$ 亿年, $t_1 \approx 25$ 亿年。说明该区金矿化主要发生在燕山早期,而黄铁矿、黄铜矿化略晚于主要金矿化,与地质证据吻合。国际上曾有人做过石英包

④ 王义文,1985,中国金矿床稳定同位素特征及研究意义
⑤ 张志兰,1987,广东河台金矿的铅、硫同位素特征

裹体中的铀同位素工作,而铅同位素工作尚属首次。目前,张志兰等正在尝试由做石英中微量铅转向做石英包裹体中微量铅的研究工作。

砂金中的微量铅同位素研究意义也很重大。通过其与附近地质体或原生矿体铅同位素对比研究,可以追索原生矿源。例如吉林延边地区发育与中生代火山岩、次火山岩和中酸性小侵入体有关的金矿床,该区广泛发育的砂金矿床的铅同位素组成与上述原生矿床完全一致,从而反映了其物质来源(王义文,1984)^①。

林尔为等(1985)在对金厂峪金矿铅同位素研究中⁽⁴⁾,开展了全岩斜长角闪岩铅同位素淋洗模拟实验(表1)。L₁为最初淋滤出的易溶组分,L₂为最后难溶组分。数据表明,易溶组分含有较高的放射成因铅。因此,在岩石变质、交代、重熔或混合岩化过程中,其放射成因铅往往优先进入成矿溶液。这也解释了图1中为什么矿石铅的点位于变质岩铅和花岗岩铅之间,且比变质岩富含放射成因铅。

表1 斜长角闪岩全岩淋洗样铅同位素组成

	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb
L ₁	17.201	15.477	37.308	0.8997	2.1688
L ₂	16.593	15.355	36.611	0.9253	2.2064
L ₃	15.162	14.959	34.801	0.9873	0.2962

(据林尔为,1985)

三、金矿床的硫、碳同位素研究

硫、碳化合物是金的重要矿化剂。金的迁移、沉淀与某些含硫、含碳原子团的行为密切相关。因此,根据矿床的硫、碳同位素组成特征和变异规律,可以确定矿化剂的来源和成矿作用发生的物理化学条件。目前已不再只局限于对硫、碳同位素作简单的地质类比研究,而是充分考虑成矿溶液的化学性质对矿物同位素组成的影响。通常是利用大本模式来探讨成矿溶液的总硫 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ES}}$ 和总碳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{EC}}$ 值,并可计算溶液的氧逸度、硫逸度等物理化学参数。

硫同位素研究的重大进展之一是开展了金矿床硫同位素组成背景值的研究。发现许多矿石硫同位素组成与容矿地层的硫同位素背景值有隶属关系。太古宙岩石的硫同位素背景值以接近陨石值为特征,而元古宙背景值则偏离陨石值富含重硫(王义文,1984,1987)^②。与之对应,产在其中的金矿床的硫同位素也分别具有陨石值和偏离陨石值富含重硫的不同特征。

构造地球化学研究是一新兴的学科。对构造同位素地球化学的研究目前仅做了一些硫同位素的尝试。研究表明,在同一构造单元中,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与硫化物的含量及所处的构造位置有关。在膨胀的大交错带中,硫化物含量最富,而 $\delta^{34}\text{S}$ 值最低。在拉长的翼部,硫化物贫, $\delta^{34}\text{S}$ 值高。在变质作用和构造作用过程中, ^{32}S 往往优先向低温(低变质相)和低压带中迁移。

四、金矿床的氢、氧同位素研究

几乎所有重要的内生金矿床皆为不同成因的热液矿床。水是含金络合物迁移和沉淀的最重要介质。因此通过矿物氧同位素及矿物包裹体水的氢氧同位素测试,可以得出成矿溶液的氢氧同位素组成,判断成矿溶液的性质及来源。

① 王义文,1984,金矿床研究中矿石铅同位素数据的使用和解释

② 王义文,1984,金矿床研究中使用和解释硫同位素数据的某些原则和方法

研究表明,大多数金矿床成矿溶液的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值变化较大,而 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值变化较小。在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图上,平行横坐标向雨水线延伸,呈现氧同位素漂移特征。引起这种现象有两个原因:①成矿溶液为大气降水,它与富 ^{18}O 的围岩发生水-岩交换反应。例如李家沟金矿和冶岭头金矿(徐步台等,1987;郑明华等,1986)^①;②不同成因水的混合。例如团结沟金矿(王义文,1986^②)、河台金矿(沈渭洲等,1987)^③和胶东金矿(姚凤良等,1983^④;张理刚,1986),成矿岩浆热液中均有晚期大气降水热液的混入。

刘裕庆曾测定了大量石英样品包裹体水,发现 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 大多数为负值,一般位于 -5% 左右,仅个别为正值。他认为,包裹体水与石英中氧的同位素交换是可以忽略的,而引起氧同位素组成变化的主要原因是包裹体内部 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}-\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ 等的同位素交换。实际上包裹体水中 δD 值也同样受到包裹体内部 $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4-\text{H}_2\text{O}$ 等的同位素交换反应的影响。因此,他提出在做包裹体水的氢氧同位素研究时,应根据分馏系数(α)与温度(t)的关系进行校正,方可得出正确结论。这也是当前我国氢氧同位素研究中仍尚待进一步探索的问题。

五、金矿床成矿年龄测定的新途径

成矿时代问题往往导致对矿床成因的认识争论不休。因此较准确地解决成矿时代问题十分重要。以往常常是通过各种间接的手段来获得成矿年龄。最近,吴尚全等(1987)^⑤通过对含金石英脉的K-Ar年龄测定,直接获得了夹皮沟金矿床的成矿年龄(表2)。

表2 夹皮沟矿区石英的钾-氩年龄测定结果

样号	矿物	K(%)	大气氩(%)	^{40}Ar	$^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$	年龄值(Ma)
红5-1	石英	0.126	15.97	0.017260	0.114826	1334.63 ± 31.80
板4-3	石英	0.137	8.09	0.031020	0.189799	1864.43 ± 45.44

(据吴尚全,1987)

石英是一种普遍含微量钾的矿物,所以测石英的钾-氩年龄,就代表了石英的生成年龄,也代表了与石英同时生成的金矿年龄。该方法尚属首次尝试。这一新方法的尝试,为解决矿床成矿时代开辟了新的道路。但该方法目前仍属探索阶段,与之有关的许多理论和实验问题仍有待于进一步解决:①理论基础问题,即石英究竟保存氩的能力如何?适不适合于作K-Ar法测定?②石英中钾的赋存状态问题,如何提取石英晶格中的补偿 K^+ 及石英包裹体中的微量钾,而除去微裂隙中的含钾矿物微细包体和吸附 K^+ 。③测定石英中钾含量方法的可靠性?目前吴尚全、魏连壁(1987)采用的是高精度原子吸收分光光度计法^①,测定范围为0.0n—10%,相对偏差为0.2—0.6%。刘嘉麒提出测微量钾的最好方法为同位素稀释法。④大气氩的混入问题。⑤石英中所含氩,可能是大气氩与深源氩的混合,因此与Rb-Sr法一样,存在一初始比值问题。利用等时线方法得出的年龄可能更真实。有人提出,如果该方法可行的话,那么直接用石英的 ^{39}Ar 法测定年龄,可以不管其钾含量多少及测钾方法,从而使测量精度大大提高。

此外,李宇峰、孙家树(1987)用直接测定热液蚀变矿物绢云母的Rb-Sr年龄来确定热液金矿床的形成时代^⑥。他们对胶东牟乳地区三个金矿床测试了5个绢云母的Rb-Sr年龄,除一点外,其余四点落在同一条等时线上,相关系数 $r = 0.9946$, $t = 80 \pm 6\text{Ma}$,代表绢云母的形成时代,亦代表金矿床的形成时代。而矿区

- ① 王义文,1986,金矿床研究中氢、氧同位素数据的使用和解释
- ② 沈渭洲等,1987,河台金矿床的稳定同位素地球化学研究
- ③ 吴尚全,1987,含金石英的钾-氩年龄测定及其地质意义
- ④ 魏连壁,1987,原子吸收分光光度法高精度测定岩石与矿物中钾
- ⑤ 李宇峰,孙家树,1987,胶东金矿成矿时期的讨论

昆崙山混合花岗岩的K-Ar年龄,全岩157Ma,黑云母175Ma。显然成矿时代较新,这与燕山期的新华夏系构造活动密切相关。

六、稳定同位素在金矿找矿及矿床评价中的作用

稳定同位素在金矿找矿和矿床评价中正发挥着越来越重大的作用。利用矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以预测金矿床类型、评价金矿化强度。例如胶东地区,石英脉型金矿床平均 $\delta^{34}\text{S}$ 值为+5—+7‰,蚀变岩型金矿床平均 $\delta^{34}\text{S}$ 值为+8—+12‰;平均值小于5‰的硫化物则与多金属矿化有关。在同一矿区中矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值愈高,矿石品位也愈高。利用矿石硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值的区域变异规律及硫同位素等值线可以进行区域成矿预测,选择找矿靶区。例如胶东地区,从西至东 $\delta^{34}\text{S}$ 值由+12.1‰(三山岛)→+9.5‰—+10.1‰(焦家,新城)→6.7‰(玲珑),表明矿带西部的剥蚀深度比东部大得多,从而指出在东部(玲珑)深部找矿和在西部沿海寻找砂金矿是较有希望的(王义文,1982,1984,1985)^①。在夹皮沟金矿区可利用硫同位素的空间变化规律进行深部找矿预测(闰秀文,1987)。

铅同位素比值也可作为找矿标志,并可圈定勘探与钻孔的施工位置。朱炳泉等(1987)提出^②,从铅同位素组成看,金主要有两种物质来源:一类是与火山岩和其他基性岩有关,具明显、较均一的幔源铅同位素特征,如北疆与胶东金矿;另一类与深变质岩有关,具明显的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 富集特征,如破山、银洞坡与夹皮沟金矿。上述两种类型铅在一定的地区(包括岩石、铁帽等)具有非常均一的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值,据此可用于找金矿。他们在北疆地区用该方法找金取得一定效果。在华北陆台广大范围内还可利用矿石铅同位素信息预测矿床规模和评价化探异常,也可将花岗岩侵入体的岩石铅同位素特征作为评价中生代花岗岩是否具有金成矿专属性的标志。

主要参考文献

- [1] 姚凤良等 1983 招掖金矿带稳定同位素地质及金矿床成因 长春地质学院学报 第4期
- [2] 王义文 1982 我国主要类型金矿床同位素地质学研究 地质论评 第2期
- [3] 栾世伟等 1985 小秦岭金矿床地球化学 矿物岩石 第2期
- [4] 林尔为等 1985 冀东金矿集中区的铅同位素研究 长春地质学院学报 第4期
- [5] 郑明华、刘建明 1986 论浙江治岭头金银矿床的成矿物质来源 矿床地质 第1期

① 王义文, 1985, 中国金矿床稳定同位素特征及其研究意义

② 朱炳泉, 毛存孝, 1987, 应用铅同位素技术找金矿的可行性探讨