

文章编号 10258-7106 (2006) 05-0582-08

如何解释陈家杖子金矿的铅同位素资料

——与余宏全等商榷*

韩 发

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 文章对赤峰地区陈家杖子、安家营子金矿床的铅同位素资料进行了综合分析, 结果表明: ①两个矿区硫化物的铅均为异常铅, 其模式年龄无任何意义; ②在常规 Pb/Pb 图解上, 陈家杖子硫化物数据点趋势线是 ^{204}Pb 误差线, 而不是来自两个不同源区的成矿物质混合作用所形成的混合线; ③在常规 Pb/Pb 图解上, 陈家杖子-安家营子硫化物数据点构成一条等时线, 用此等时线计算, 矿化物源区源岩的年龄(t_r)为 2.587 Ga, 与建平杂岩变质高峰期的年龄基本一致; ④建平杂岩经历高级变质-分异作用之后, 其 μ 值显著降低($\mu_3 = 6.03$), 变成了一套具代表性的下地壳岩石; ⑤陈家杖子、安家营子金矿的成矿物质直接来自下地壳岩石——建平群变质岩, 但它们至少经历了 3 个阶段的演化史。

关键词 地球化学 铅同位素 成矿物质来源 金矿床 陈家杖子 赤峰 内蒙古

中图分类号 P618.51 P597

文献标识码 A

How to explain Pb isotope data: Comments on a paper by She Hongquan et al. in «Mineral Deposits»

Han Fa

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

She Hongquan et al. have published a paper entitled “Geological and geochemical characteristics and genesis of Chenjiazhangzi cryptoexplosive breccia pipe gold deposit, Chifeng, Inner Mongolia” in «Mineral Deposits» (She et al., 2005). In view of the fact that there are some wrong explanations about the Pb isotopic data in She's paper, the author decides to reexplain She's Pb isotopic data and make the following comments: ① Lead in sulfides of Chenjiazhangzi gold ores is exclusively anomalous lead, so its model ages are meaningless. ② In the $^{207}Pb/^{204}Pb$ versus $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram, the data points of Chenjiazhangzi sulfides exhibit a linear array, which is a ^{204}Pb error line rather than a “mixing line”. ③ In the conventional Pb/Pb diagram, the data points of sulfides from the Chenjiazhangzi-Anjiayingzi gold orefield define an isochron, the slope of which is (0.181 ± 0.040) (2σ , 95% confidence limit). Using the known ore-forming age ($t_s = 0.191$ Ga), the age(t_r) of the source region of ore-forming material calculated from the slope of isochron is (2.587 ± 0.334) Ga (2σ). This age corresponds to the peak of granulite-facies metamorphism of the host rocks——Jianping Complex. Sm-Nd whole-rock isochron date of $(2\,846 \pm 68)$ Ma has been reported and interpreted as the time of separation of igneous protoliths from the mantle. During a period of 300 Ma which separates this date from the peak metamorphism of Jianping

* 本文属成矿作用与资源评价开放实验室成果, 由中国地质科学院 KL05-8 专项资金资助

第一作者简介 韩 发, 男, 1939 年生, 研究员, 长期从事矿床地质和地球化学研究工作。

收稿日期 2005-10-07; 改回日期 2006-05-19。许德焕编辑。

Complex, the whole process of “crustal accretion-differentiation superevent” was completed, and the newly-formed segment of the crust accomplished stabilization. ④ Generally, the ore-forming material has experienced three-stage evolutionary history: at time t_1 (2.85 Ga ago), the components differentiated from the mantle reservoir and evolved for a period in the higher U/Pb new accretive segment of the crust ($\mu_2 = 14.81$); at time t_2 (2.5 Ga ago), this segment underwent high-grade metamorphism-differentiation which lowered the U/Pb of the new crust ($\mu_3 = 6.03$); at time t_3 (0.191 Ga ago), Pb was extracted from the underlying old metamorphic rocks by tectono-magmatic events, and then incorporated into sulfides of gold ores. ⑤ According to the facts mentioned above, the ore-forming material of Chenjiazhangzi gold ores was formed during Yanshannian orogeny and derived mainly from the lower crust reservoir, so lead in their sulfides possessed less radiogenic isotopic composition of lead.

Key words: geochemistry; lead isotope; source of ore-forming material; gold deposit; Chenjiazhangzi; Chifeng; Inner Mongolia

余宏全等近期在《矿床地质》上发表了题为‘赤峰陈家杖子隐爆角砾岩型金矿床地质地球化学特征与成因’的论文(余宏全等, 2005)。该文(以下简称余文)对研究区的硫化物、花岗岩、变质岩等进行了铅同位素测定, 并做了全面分析。本文拟就如何解释铅同位素资料问题与余宏全等讨论如下。

1 全岩铅同位素资料能否用于计算模式年龄

余文对研究区内 4 类岩石(角砾晶屑凝灰岩、花岗岩、片麻岩及侏罗-白垩纪火山岩)的全岩样品进行了铅模式年龄计算(表 1)。由表 1 可见, 各类样品铅模式年龄的变化范围均在 100 Ma 以上, 大者可达 600 Ma, 完全超出了铅模式年龄的允许误差。通过验证, 余文在计算全岩样品模式年龄时, 用的是霍尔姆斯-侯特曼斯模式(以下简称 H-H 模式)。为了方便起见, 本文暂以该模式为例进行讨论。H-H 模式公式(Faure, 1986)如下:

$$\frac{{}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} - b_0}{{}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} - a_0} = \frac{1}{137.88} \cdot \frac{e^{\lambda_2 T} - e^{\lambda_2 t}}{e^{\lambda_1 T} - e^{\lambda_1 t}}$$

其中, T 为地球年龄, a_0 、 b_0 为地球初始铅的同位素组成, t 为欲求之矿物形成年龄(即模式年龄), λ_1 、 λ_2 分别为 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 的衰变常数。H-H 模式是以地球铅演化最简单的模式为基础的, 其假设条件是: ①地球最初是流体, 而且是均一的, 铀、钍和铅是均匀分布的; ②原始铅的同位素组成到处都一样; ③后来, 地球变成刚体, 并且 U/Pb 比值出现了区域性差异;

④在任何给定的地区, U/Pb 比值的变化只因铀放射性衰变成铅引起; ⑤在含铅矿物(如方铅矿)形成时, 铅与铀和钍分离开, 从此其同位素组成保持不变。因此, 只有满足上述 5 项条件时, 才能用 H-H 模式来计算矿物形成年龄, 即 H-H 模式年龄。模式年龄及来源区 μ 值的地质可靠性, 取决于铅具有单阶段演化史的假设。显然, 全岩样品中的铅不满足上述条件。姑且不问被研究岩石的物质是否直接来自地幔, 是否具有单阶段的演化历史, 仅就铅的性质而言, 全岩样品中的铅就不是普通铅。岩石自形成至今, 其中的铅一直未脱离母体, 放射性成因铅一直在增加, 铅的同位素组成一直在改变着。这种铅当然不能用于铅同位素模式年龄(及 μ 值、Th/U 比值)的计算。假如某种岩石来自地幔, 并且自形成至今, 其 U-Th-Pb 体系一直处于封闭状态, 则该样品的铅同位素模式年龄应为零值, 陨石样品即如此。反之, 模式年龄不为零值的全岩样品的铅均是异常铅, 其模式年龄无任何意义。但在中国的刊物或专著中, 对全岩样品进行铅模式年龄(及 μ 值、Th/U 比值)计算的情况屡见不鲜(袁峰等, 2006; 谢才富等, 2004; 聂凤军等, 2001; 2002; 王登红等, 2002; 李华芹等, 1998; 陈好寿, 1994; 沈保丰等, 1994; 戴仕炳等, 1991)。研究者的目的是什么? 难道是为了获得时间为‘0’值的采样年龄吗?

2 如何正确判别硫化物铅同位素模式年龄

在一般情况下(即硫化物中只含痕量的 U、Th), 硫化物中的铅都是普通铅, 可探讨性地计算其模式年龄。但是, 计算结果有时是有意义的, 有时是无

表 1 陈家杖子金矿主要矿石及围岩铅同位素测定结果(余宏全等,2005)

Table 1 Lead isotope composition of major ores and wall rocks in the Chenjiazhangzi gold deposit (She et al. , 2005)

序号	样号	测试对象	采样位置	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	t/Ma	μ	U/Pb	Th/Pb
1	Cjz-88	胶状黄铁矿	陈家杖子	16.756	15.348	36.873	619	8.00	0.1331	4.02
2	Cjz-106	黄铁矿	陈家杖子	16.693	15.282	36.712	591	7.89	0.1313	3.96
3	Cjz-89	毒砂	陈家杖子	16.733	15.332	36.865	619	7.98	0.1327	4.03
4	Cjz-132	黄铜矿	陈家杖子	16.828	15.398	37.020	622	8.08		
5	Cjz-132	闪锌矿	陈家杖子	16.844	15.457	37.425	659	8.6		
6	Cjz-132	毒砂	陈家杖子	16.734	15.301	36.861	600	7.95		
7	ZK4-21	含角砾晶屑岩屑凝灰岩	陈家杖子	16.753	15.292	36.885	553	7.90	0.1315	4.02
8	Cjz-85	含角砾晶屑岩屑凝灰岩	陈家杖子	19.370	15.600	37.505				
9	Cjz-91	二长花岗斑岩	陈家杖子	16.844	15.298	36.936	478	7.89	0.1314	3.98
10	Cjz-121	花岗岩	陈家杖子	16.416	15.201	36.539	912	8.08	0.1345	4.08
11	Cjz-124	花岗岩	陈家杖子	16.583	15.286	36.817	686	7.91	0.1317	4.10
12	Cjz-116	新太古宙混合片麻岩	陈家杖子	16.816	15.347	37.111	558	7.98	0.1327	4.10
13	Cjz-118	新太古宙斜长角闪片麻岩	陈家杖子	16.509	15.331	36.942	801	8.01	0.1332	4.23
14	Lmd-1	晚侏罗世含角砾熔结凝灰岩	喇嘛洞	17.491	15.330	37.710				
15	Lmd-4	晚侏罗世含角砾熔岩	喇嘛洞	17.266	15.295	37.462	110	7.85	0.1306	3.97
16	Gd-1	白垩纪火山岩	官地金矿	17.143	15.350	37.429	291	7.95	0.1323	4.05
17	Tjy-17	长城系硅质糜棱岩	陶家营子	18.38	15.439	38.870				
18	Tjy-22	长城系硅质糜棱岩	陶家营子	17.167	15.254	37.152	138	7.78	0.1295	3.87

意义的,为此,Faure(1986)提出了以下判别准则:①取自给定矿床一套有代表性样品的模式年龄必须一致;②取自给定矿床的铅同位素比值,在实验误差范围内必须是个常数;③模式年龄必须是正数;④模式年龄一般应与矿床中其他矿物的同位素年龄及成矿母岩的同位素年龄相一致。通过判别,将那些能给出有意义模式年龄的普通铅称为“正常铅”,反之则称为“异常铅”。换言之,只有正常铅才能给出有意义的模式年龄,异常铅则不能用于模式年龄计算。因此,在探讨性地对硫化物铅进行模式年龄计算后,应该作出合理的判别,决定取舍。切忌用无意义的资料进行无意义的讨论。

余文对陈家杖子 6 个硫化物铅进行了模式年龄计算,其结果变化于 591~659 Ma 之间,与其他同位素年代学方法获得的成矿母岩年龄(191~177 Ma)大相径庭。毋庸置疑,陈家杖子硫化物的铅是异常铅,其模式年龄及 μ 值均无意义。但是余文认为,该年龄代表了成矿物质“从源区中分离出来的时间,而后受燕山期构造岩浆活动的影响,这种成矿物质被加入到成矿热液中”。这种可能性是完全不存在的,原因在于:①余文认为,矿石铅是上地幔与下地壳两种端员组分混合的结果。既然如此,这种来自两个源区的混合物就不可能给出有意义的模式年龄。也就是说,余文中的年龄数据从根本上就是不可信的。②由图 1 可见,陈家杖子硫化物中的铅含放射

性成因铅较低,其铅同位素组成的真实值应以 2 号、3 号和 6 号样品为代表,其平均值为 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 16.720;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.305(原因见后述)。从表 1 可见,矿区主要地层——新太古宙混合片麻岩全岩(两个样均值)的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 分别为 16.662、15.339,与硫化物样品的铅同位素组成十分相近。这意味着硫化物的铅可能主要来自新太古宙的片麻岩,这也正是硫化物的铅含放射性成因铅较低的原因所在。老片麻岩中的铅是自新太古代一直演化到现在的结果,可见硫化物的形成年龄亦应该是很年轻的,这与该区金矿床形成于燕山早期是一致的。同样,与成矿作用有关的花岗岩的铅同位素组成与老片麻岩的铅同位素组成也很相似(见表 1),说明花岗岩可能也是来自下伏太古宙老片麻岩(见后述)。总之,研究区内新太古宙片麻岩、燕山期花岗岩及有关硫化物铅同位素组成的相似性,是它们有着共同物质来源的结果,而不是余文所说“受到了晋宁构造运动的影响”。特别是花岗岩是在燕山期形成的,在未“出生”之前(在 478~921 Ma 之间),它是怎样受到晋宁构造运动影响的呢?③如余文所说,成矿物质是在晋宁运动中从来源区分离出来的,而后在燕山期加入到成矿热液中,在此不禁要问:(a)600 Ma 前被分离出来的成矿物质储存在什么地方,以保证其铅同位素组成一直不改变?(b)储存这种普通铅的载体是什么?(c)这种被储存的普通铅,

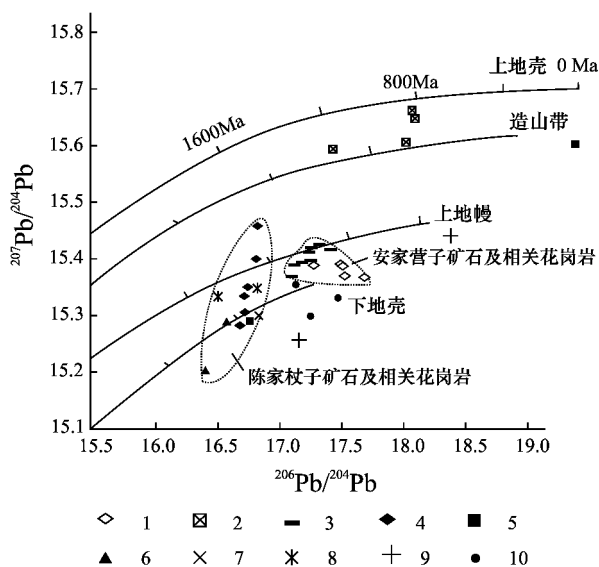


图 1 陈家杖子金矿主要岩(矿)石 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素演化图(据余宏全等, 2005)

1—安家营子花岗岩; 2—安家营子变质岩; 3—安家营子矿石单矿物; 4—陈家杖子矿石单矿物; 5—陈家杖子隐爆角砾岩; 6—陈家杖子花岗岩; 7—陈家杖子二长花岗岩; 8—陈家杖子变质岩; 9—陶家营子糜棱岩; 10—陈家杖子矿区外围火山岩

Fig. 1 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ evolutionary diagram of major rocks and ores in the Chenjiazhangzi gold deposit (after She et al., 2005)

1—Anjiayingzi granite; 2—Anjiayingzi metamorphic rocks; 3—Individual minerals from Anjiayingzi ores; 4—Individual minerals from Chenjiazhangzi ores; 5—Chenjiazhangzi cryptexplosive beecia; 6—Chenjiazhangzi granite; 7—Chenjiazhangzi adamellite; 8—Chenjiazhangzi metamorphic rocks; 9—Taojiayingzi mylonite; 10—Volcanic rocks in the periphery of the ore deposit

在燕山期有选择性地从载体中被活化出来,但无任何外来铅的加入,这是一种什么样的机制?

顺便指出,与硫化物相似,长石类矿物往往含 U、Th 很低,在一般情况下,该类矿物中的铅也可看作是普通铅。因此,在解释长石的铅同位素资料时,上述有关讨论也同样适用,万不可用异常铅资料进行模式年龄及来源区源岩 μ 值的计算。比如,阿尔泰造山带同造山期及后造山期花岗岩中钾长石铅为异常铅,27 件铅同位素资料(童英等, 2006)均未给出有意义的模式年龄,但是,童英等(2006)竟然用这组资料进行成岩物质来源区源岩 μ 值的计算,这显然是不对的,这组 μ 值是无意义的。

3 如何解释铅同位素数据点的线型分布趋势

在铅同位素地球化学研究中,在常规 Pb/Pb 图

解上,数据点呈线型分布可能有以下 3 种情况:① 常规等时线;② 混合线(Andrew, 1984; Faure, 1986);③ ^{204}Pb 误差线。

由图 1 可见,陈家杖子 6 个硫化物样品的数据点呈线性分布,其斜率 $R = 1.18$,余文认为,这是一条等值线(似应为“等时线”——笔者注),是由上地幔与下地壳两种端员组分混合形成的。显然,余文把这条线看成是混合线。Andrew(1984)强调指出,混合线(mixing line isochron)是由来自两种不同源区的铅混合作用形成的,① 这种铅必须是同时从两个不同源区被活化出来的,② 混合作用与矿化作用是同时发生的,③ 混合线不满足常规等时线方程的要求。据图 1 经计算,硫化物趋势线与下地壳演化线的交点年龄为 542 Ma,与上地幔演化线的交点年龄为 836 Ma,两者相差近 300 Ma,也就是说,形成硫化物的铅在两个源区内不是同时被活化出来的。前后相差近 300 Ma 脱离源区的铅同时在矿化中发生混合作用,这是不可能的。另外,陈家杖子-安家营子金矿化时间是在燕山早—中期,与上述年龄相差甚远。可以肯定,在图 1 上,硫化物数据点的趋势线不是两种不同源区混合作用的结果,不是混合线。

为了验证这条趋势线是否可能是二次(或三次)等时线,笔者用其斜率(1.18)及矿化年龄(0.191 Ga),经计算获得成矿物质来源区源岩的年龄 $t_r = 5.44 \text{ Ga}$ 。该计算结果比地球年龄大得多,显然是不合理的。因而,这些硫化物数据点的趋势线不是常规等时线。

事实上,这条趋势线是 ^{204}Pb 误差线。经计算,6 个硫化物样品 ^{204}Pb 误差线的斜率 $R' = 0.915$,质量分辨率误差线斜率 $R'' = 1.373$ 。这两条误差线的联合作用控制着样品数据点的分布趋势,统称 ^{204}Pb 误差线。6 个硫化物样品数据点回归线的斜率 $R = 1.18$,刚好介于 R' 和 R'' 之间,是一条典型的 ^{204}Pb 误差线。

经上述分析后,应设法确定硫化物铅同位素组成的真实值。从图 1 可见,6 个硫化物数据点中,含放射性成因铅较低的 3 个点(表 1 中 2、3、6 号样品)与片麻岩、花岗岩、隐爆角砾岩的数据点集中位于一个区域内,说明这 3 个硫化物样品的铅同位素组成可能更接近真实值。另外,在常规的铀铅图解上,陈家杖子这 3 个数据点与安家营子 8 个硫化物数据点有很好的线型分布趋势(见后述),这也进一步证明了陈家杖子含放射性成因铅低的样品最具代表性。

上述证明,陈家杖子硫化物的铅不是正常铅,不能给出有意义的模式年龄及来源区的 μ 值,硫化物数据点构成的趋势线是 ^{204}Pb 误差线,无任何计时意义。这是否意味着陈家杖子铅同位素资料就没什么用呢? 现具体讨论如下。

4 硫化物的 Pb/Pb 等时线——如何确定成矿物质来源

由图 2 可见,陈家杖子硫化物铅同位素资料经合理分析后,其代表性数据点与安家营子硫化物数据点构成了一条等时线,等时线数据处理用的是 ISOPLOT 程序(Ludwig,2002),其斜率 $R = 0.181 \pm 0.040 (2\sigma, 95\% \text{ 信度水平})$, $\text{MSWD} = 5.3$ 。为对比起见,将陈家杖子矿区 1 个片麻岩和 1 个花岗岩样品的铅同位素资料也投影到图 2 中。尽管这两个全岩样品的铅同位素组成是现代值,但因硫化物矿化较年轻,故由其时间差所造成的同位素组成之差不会很大。从图 2 可见,片麻岩和花岗岩样品的数据点与硫化物样品的数据点有很好的共线性,这充分说明它们具有共同的铅源。

取矿化年龄 $t_s = 0.191 \text{ Ga}$ (余宏全等,2005),用图 2 等时线的斜率,求得成矿物质来源区源岩年龄

$t_r = (2.587 \pm 0.334) \text{ Ga}$ ($2\sigma, 95\% \text{ 信度水平}$)。该年龄值与建平杂岩中 TTG 岩系的侵位年龄和变质高峰年龄基本一致(王时麒等,1994),有力证明了成矿(成岩)物质来自下伏新太古代老基底。反过来,这些资料的合理性也进一步证明了,研究区的成矿作用就是发生在燕山早—中期,成矿物质直接来自下伏老基底,而不是来自上地幔与下地壳两种源区的混合,更不是在晋宁运动期间($591 \sim 695 \text{ Ma}$)从源区中被活化出来的。可见,该研究区硫化物的铅虽然是异常铅,但为研究矿化年龄及成矿物质来源提供了十分重要的信息。

必须指出,由于不同研究者取样代表性及样品分离方面的差别,由于测试技术上的原因及不同批次测量数据间不可避免地存在测试误差,因而,图 2 中等时线斜率的均方差较大($2\sigma = 0.040$),导致源岩年龄误差也较大($2\sigma = 0.334 \text{ Ga}$)。尽管如此,源岩年龄的均值($t_r = 2.587 \text{ Ga}$)是可信的,该年龄与建平杂岩变质年龄的一致性绝不是偶然的。

5 铅在三阶段体系中的演化——如何计算 μ 值

图2中的等时线是二次等时线还是三次等时

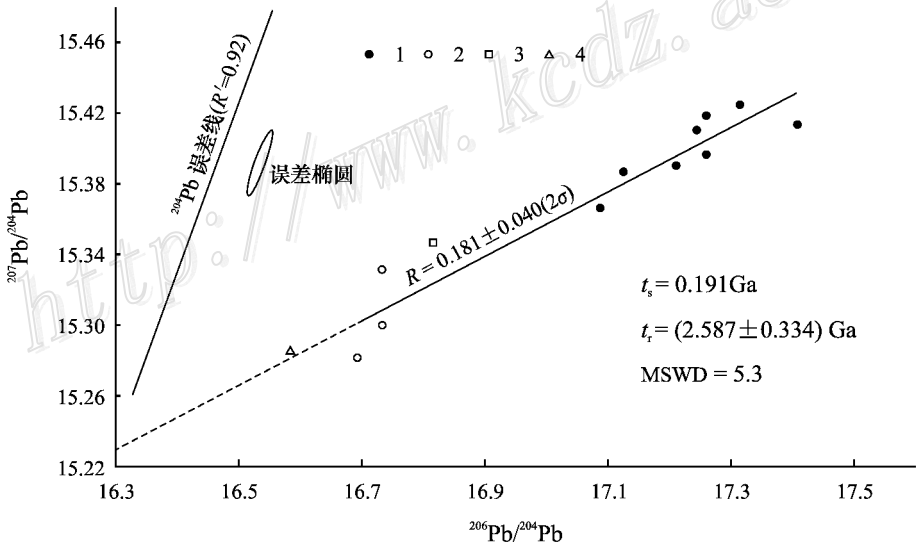


图 2 陈家杖子-安家营子金矿床硫化物的 Pb/Pb 图解(资料引自余宏全等,2005;王时麒等,1994)
其中的片麻岩和花岗岩数据点未参与等时线回归分析
1—安家营子硫化物 2—陈家杖子硫化物 3—片麻岩 4—花岗岩

Fig. 2 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isochron plot of sulfide data from the Chenjiazhangzi-Anjiayingzi gold orefield (data from She et al., 2005; Wang et al., 1994)

1—Anjiayingzi sulfide; 2—Chenjiazhangzi sulfide; 3—Gneiss; 4—Granite

线,直接关系到成矿物质在地质历史中的演化过程及来源区 U-Th-Pb 体系特征参数的确定。为此,必须查明研究区内建平杂岩形成、发展的演化史。首先,建平杂岩中层状镁铁质-超镁铁质(火山)岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $(2\,846 \pm 67)\text{ Ma}$,王时麒等(1994)认为,该年龄代表了建平杂岩的形成年龄;其次,建平杂岩中 TTG 岩系的侵位时间为 $2\,522 \sim 2\,475\text{ Ma}$,这可能是形成建平杂岩的构造-岩浆活动结束的年龄,也是变质事件开始的年龄;最后,建平杂岩不同类型变质岩中锆石单颗粒蒸发法年龄为 $2\,496 \sim 2\,460\text{ Ma}$,可能代表该区变质高峰期年龄(王时麒等,1994)。因此,建平杂岩自形成到高级变质作用结束,大体上经历了 2 个主要阶段:① 成岩物质从上地幔源区中分离出来,层状镁铁质-超镁铁质(火山)岩套形成阶段, $t_1 = 2.846\text{ Ga}$;② TTG 岩系

侵位-高级变质作用阶段, $t_2 = 2.522 \sim 2.460\text{ Ga}$ 。在第 2 阶段完成后,新生陆壳实现了稳定化作用。由此可见,建平杂岩可能就是在在一个较短的时间段(约 300 Ma)内,经历了快速的火成活动、变质作用及地球化学分异作用,完成了《CADS》事件(crustal accretion-differentiation superevent)的全过程(Moorbath, 1977; Whitehouse et al., 1986)。自古元古代之后,整个华北地台基本上处于稳定状态,尽管在中元古代及晚古生代有某种程度的局部的构造-岩浆事件发生,但整体上对老变质岩的物质组成未产生重大改变性的影响。燕山期构造-岩浆活动与金矿化关系密切,花岗质岩浆岩主要是来自太古宙老变质岩的深部重熔作用(王时麒等,1994)。这是一次直接导致成矿物质从源岩中活化出来的构造-热事件,矿石硫化物中的铅必然记录了这次事件的相关信息。显

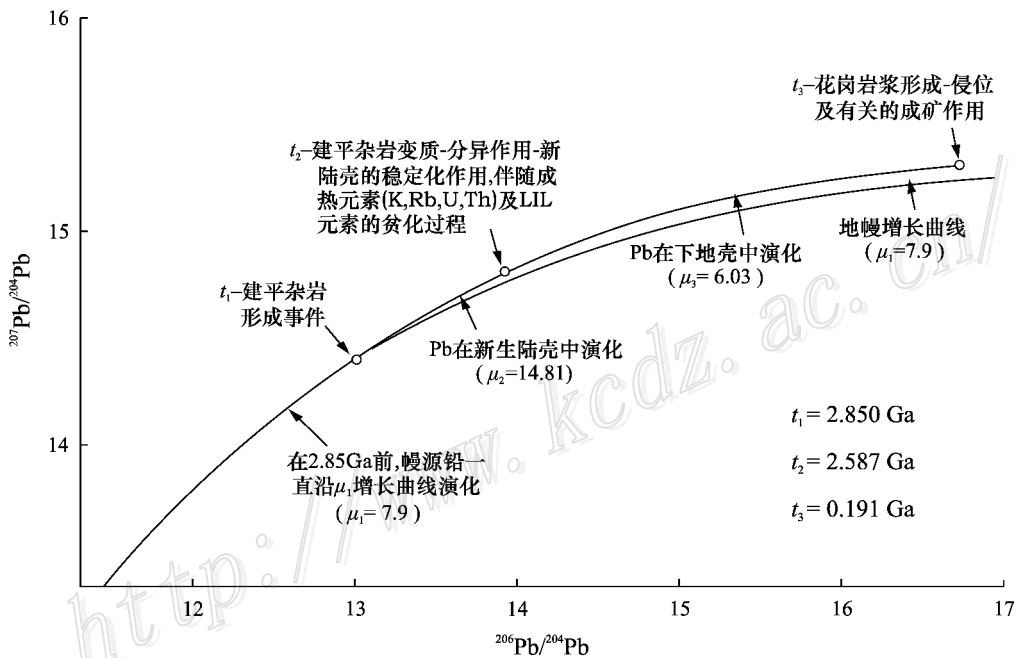


图 3 陈家杖子-安家营子金矿床中铅在三阶段体系中的演化图解

第三阶段铅的同位素组成取自陈家杖子硫化物 6 号样品。目前,关于中朝古陆胶辽陆块下部上地幔源区的 μ_0 值尚无可靠资料,故引用有关上地幔源区 μ_0 值的普遍性资料(Tatsumoto, 1978; Tilton, 1983; Brevart et al., 1986; Dupre et al., 1990),本文取 $\mu_0 = 7.9$ 。本图 μ 值的计算和增长曲线的构建是用 PBPROG 程序^①完成的。

Fig. 3 Three-stage evolution of the sources of Pb in the Chenjiazhangzi-Anjiayingzi gold orefield. At time t_1 (2.850 Ga ago), the components differentiated from the mantle reservoir and evolved for a certain period in the higher U/Pb accretive crust ($\mu_2 = 14.81$); at time t_2 (2.587 Ga ago), this accretive crust underwent metamorphism-differentiation which lowered the U/Pb of the new crust ($\mu_3 = 6.03$); at time t_3 (0.191 Ga ago), Pb was extracted from old underlying metamorphic rocks (lower crust) by tectonomagmatic events and then took part in sulfide formation of the gold ores. A mantle reservoir μ_0 of 7.9 and the lead isotope value of sample Cjz-132 in Table 1 as the end Pb isotopic composition have been used.

① 韩 发,韩景仪,李振清. 2005. 铅同位素地球化学应用程序(PBPROG). 未刊资料.

而易见,陈家杖子-安家营子地区金矿成矿物质基本上经历了三阶段演化史。因此,图 2 中硫化物的 Pb/Pb 等时线是三次等时线。图 3 是该研究区硫化物铅三阶段演化图解。由图 3 可见,当建平杂岩从上地幔源区分离出来时,其 U/Pb 比值较高 ($\mu_2 = 14.81$)。但在随后的高级变质作用期间,由于成热元素(K、Rb、U、Th)及 LIL 元素被净化出去,导致建平群变质岩 U/Pb 比值降低($\mu_3 = 6.03$),此时这套岩石变成了典型的下地壳岩。正因如此,该研究区内花岗岩及硫化物的铅含放射性成因铅均较低。余文认为,硫化物的铅是来自上地幔与下地壳的混合作用,成矿物质是在晋宁运动期间被构造-岩浆活动从源区中分离出来的。根据是什么?下地壳源岩在哪里?该研究区发生过晋宁运动吗?其表现是什么?晋宁期岩浆岩在哪里?笔者认为硫化物的铅来自下地壳,这不是一句空话,不是主观臆想。下地壳在哪里?下伏基底岩石,即建平群高级变质岩就是下地壳,成矿物质就是从这套岩石中被燕山期构造-岩浆事件活化出来的。

6 结 论

(1) 陈家杖子硫化物的铅是异常铅,用这组资料计算的铅模式年龄及 μ 值完全是无意义的。

(2) 在常规 Pb/Pb 图解上,陈家杖子硫化物数据点构成的趋势线是 ^{204}Pb 误差线,而不是两种不同源区物质混合作用形成的混合线,这组硫化物铅同位素组成的真实值是: $^{206}Pb/^{204}Pb = 16.693 \sim 16.734$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.282 \sim 15.332$ 。

(3) 在常规 Pb/Pb 图解上,陈家杖子-安家营子金矿硫化物数据点构成了一条等时线,经计算,成矿物质来源区源岩的年龄为 $(2.587 \pm 0.334) Ga$,该年龄可能代表了建平杂岩变质高峰期年龄。

(4) 在建平杂岩高级变质作用期间,随着 U/Pb 比值降低的过程,建平群变质岩变成了一套具代表性的下地壳岩石($\mu_3 = 6.03$)。

(5) 陈家杖子、安家营子金矿的成矿物质至少经历了 3 个阶段的演化史:在 $2.846 \sim 2.475 Ga$ 期间,它们从上地幔中分离出来,储集在建平杂岩中;在 $2.522 \sim 2.460 Ga$ 期间,它们经历了变质-分异作用之后,储集在新生陆壳中;在燕山早—中期($0.19 \sim 0.14 Ga$),构造-岩浆事件把它们从建平群变质岩中活化出来,形成了金矿床。

(6) 研究区内花岗岩及硫化物的铅含放射性成因铅都较低,这主要是由于成矿物质来自下地壳岩石——建平群变质岩,而不是上地幔与下地壳物质混合作用的结果。

References

- Andrew A. 1984. Mixing line isochrones: A new interpretation of galena lead isotope data from southeastern British Columbia [J]. *Econ. Geol.*, 79: 919~932.
- Brevart O, Dupre B and Allégre G J. 1986. Lead-lead age of komatiitic lavas and limitations on the structure and evolution of the Precambrian mantle [J]. *EPSL.*, 77: 293~302.
- Chen H S. 1994. The studies on lead isotopic geochemistry [M]. Hangzhou: Publishing House of Zhejiang University (in Chinese).
- Dai S B and Liu L D. 1991. Lead isotopic studies of gold deposits in northern Liaoning [J]. *Mineral Deposits*, 10(3): 243~254 (in Chinese with English abstract).
- Dupré B and Arndt N T. 1990. Pb isotopic composition of Archean komatiites and sulfides [J]. *Chemical Geology*, 85: 35~56.
- Faure G. 1986. Principles of isotope geology [M]. New York: John Wiley and Sons.
- Li H Q, Xie C F, Chang H L, Cai H, Zhu J P and Zhou S. 1998. Study on metallogenic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in northern part of Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K. 2002. Isoplot/Ex, version 2.1 [M]. Berkley: Special Publication of Geochronology Center.
- Moorbath S. 1977. Ages, isotopes and evolution of Precambrian continental crust [J]. *Chem. Geol.*, 20: 151~187.
- Nie F J, Jiang S H and Bai D M. 2002. Metallogenic studies and ore prospecting in the conjunction area of Inner Mongolia Autonomous Region (Beishan Mt.), northwest China [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Nie F J, Jiang S H and Zhao Y M. 2001. Lead and sulfur isotopic studies of the Wenyu and the Dongchuang quartz vein type gold deposits in Xiaolinling area, Henan and Shanxi provinces, central China [J]. *Mineral Deposits*, 20(2): 163~173 (in Chinese with English abstract).
- She H Q, Zhang G L, Zhang D Q, Li D X, Feng C Y, Wang Z, Meng L J and Wang Q. 2005. Geological and geochemical characteristics and genesis of Chenjiazhangzi cryptoexplosive breccia pipe gold deposit, Chifeng, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 24(4): 373~387 (in Chinese with English abstract).
- Shen B F, Luo H, Han G G, Dai X Y, Jin W S, Hu X D, Li S B and Bi S Y. 1994. Achean geology and metallization in northern Liaoning province and southern Jilin province [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Tatsumoto M. 1978. Isotopic composition of lead in oceanic basalt and

- its implication to mantle evolution [J]. *EPSL*, 38: 63~87.
- Tilton G R. 1983. Evolution of depleted mantle: The lead perspective [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 1191~1197.
- Tong Y, Wang T, Hong D W and Han B F. 2006. Pb isotope composition of granitoids from the Altay orogen (China): Evidence for mantle-derived origin and continental growth [J]. *Acta Geol. Sinica*, 80(4): 517~528 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Z G, Li T D and Fu X J. 2002. The metallogenic series and metallogenic regularities of Altay metallogenic province [M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House (in Chinese).
- Wang S Q, Sun C Z, Cun W Y, Wu C Y, Yu F Z, Yu J A, Zhao B L and Wang Y F. 1994. Geology of gold deposits in chifeng region, Inner Mongolia [M]. Hohhot: People Publishing House of Inner Mongolia (in Chinese).
- Whitehouse M J and Moorbath S. 1986. Pb-Pb systematics of Lewisian gneisses: Implications for crustal differentiation [J]. *Nature*, 319: 488~489.
- Xie C F, Xiong C Y, Hu N, Li L Q, Chang H L, Li J S and Guan K M. 2004. A preliminary study on age and genesis of Shiliping antimony deposit in south Qinling [J]. *Mineral Deposits*, 23(4): 473~483 (in Chinese with English abstract).
- Yuan F, Zhou T F, Yang W P, He L X, Fan Y, Tan L G and Yue S C. 2006. Nd, Sr, Pb, O isotope characteristics of two types granites in the Sawuer region, Xinjiang [J]. *Acta Geol. Sinica*, 80(2): 264~272 (in Chinese with English abstract).
- 戴仕炳, 刘连登. 1991. 辽北地区金矿床铅同位素地质研究 [J]. *矿床地质*, 10(3): 243~254.
- 李华芹, 谢才富, 常海亮, 蔡 红, 朱家平, 周 肃. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学 [M]. 北京: 地质出版社.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明. 2002. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向 [M]. 北京: 地质出版社.
- 聂凤军, 江思宏, 赵月明. 2001. 小秦岭地区文峪和东沟石英脉型金矿床铅及硫同位素研究 [J]. *矿床地质*, 20(2): 163~173.
- 余宏全, 张桂兰, 张德全, 李大新, 丰成友, 王 忠, 孟立军, 王 启. 2005. 赤峰陈家杖子隐爆角砾岩型金矿床地质地球化学特征与成因 [J]. *矿床地质*, 24(4): 373~387.
- 沈保丰, 骆 辉, 韩国刚, 戴新义, 金文山, 胡小蝶, 李双保, 毕守业. 1994. 辽北—吉南太古宙地质及成矿 [M]. 北京: 地质出版社.
- 童 英, 王 涛, 洪大卫, 韩宝福. 2006. 中国阿尔泰山带花岗岩 Pb 同位素组成特征 幔源成因佐证及陆壳生长意义 [J]. *地质学报*, 80(4): 517~528.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律 [M]. 北京: 原子能出版社.
- 王时麒、孙承志、崔文元, 伍程宇, 于凤芝, 余靖安, 赵宝林, 王玉芳. 1994. 内蒙古赤峰地区金矿地质 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社.
- 谢才富, 熊成云, 胡 宁, 李六权, 常海亮, 李劲松, 管魁敏. 2004. 南秦岭十里坪锑矿床成矿时代及成因的初步研究 [J]. *矿床地质*, 23(4): 473~483.
- 袁 峰, 周涛发, 杨文平, 何立新, 范 裕, 谭绿贵, 岳书仓. 2006. 新疆萨吾尔地区两类花岗岩 Nd、Sr、Pb、O 同位素特征 [J]. *地质学报*, 80(2): 264~272.

附中文参考文献

- 陈好寿. 1994. 同位素地球化学研究 [M]. 杭州: 浙江大学出版社.