

铅同位素在矿床研究和找矿勘探中的应用综述

张建芳, 张刚阳

(中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074)

摘 要: 铅同位素用于示踪成矿物质来源已得到广泛应用, 其方法主要有: 模式年龄法、 $Pb-SL$ 等时年龄法、构造模式法、 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解法以及直接对比法。其中单用模式年龄来示踪成矿物质来源已逐步淘汰, 只能用通过合理模式计算的模式年龄来进行检验或佐证; 铅构造模式因提出时没有考虑中国的地质问题而遭质疑; $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解法虽然考虑到中国的地质问题但仍需接受检验; 而直接对比法是示踪成矿物质来源最有效、最直观的方法。此外, 矿石全岩 $Pb-Pb$ 等时线定年在一些矿床中应用获得成功, 通过剔除系统样品中的后期干扰样品, 可以使矿石全岩 $Pb-Pb$ 等时线定年变得更加精确。铅同位素地球化学研究开始走向应用于化探与找矿评价, 特别是运用铅同位素三维空间拓扑投影特征值 V_1 和 V_2 进行隐伏矿深度预测和资源量评价的铅同位素系统剖面化探方法, 使铅同位素化探方法得到了新的发展。

关键词: 铅同位素; 成矿物质来源; 等时线定年; 找矿预测评价

中图分类号: P597; P629 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2009)04-0322-07

0 引言

铅同位素有 ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb 和 ^{208}Pb , 其中 ^{204}Pb 的半衰期 ($1.4 \times 10^{17} a$) 远大于地球形成时年龄 ($4.6 \times 10^9 a$), 因而可以看作是稳定同位素; 其他 3 种则都是稳定同位素。铅同位素组成的变化主要是由于放射性铀、钍衰变反应所引起, 基本不受形成后地球化学环境变化的影响。在上世纪, 铅同位素理论研究及应用资料就比较丰富。近年来, 随着实验技术的进步, 特别是 $MC-ICP-MS$ 的出现, 以及溶样前各种淋洗方法的研究^[1-4], 铅同位素测试结果的准确度和精密度都得到大大提高。本文对铅同位素在示踪成矿物质来源、矿床全岩 $Pb-Pb$ 等时线定年、找矿靶区优选以及隐伏矿床深度预测及资源量评价等方面的应用进行综述。

1 成矿物质来源示踪

铅同位素分子的质量数大, 不同的同位素分子之间相对质量差小, 因此铅元素不仅从矿源岩中浸取时不会产生同位素分馏, 而且在转移进入成矿热液并随之迁移的过程中, 即使成矿热液的物理化学条件发生变化, 它们的同位素组成一般也不会发生变化^[5]。矿石铅是指在各种热液环境中沉淀出的一些金属矿物(矿石矿物), 如方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等硫化物中的铅, 由于矿物中不含 U , Th 或含量极低, 与矿物中铅的质量分数相比可忽略不计, 且矿物形成后不再有放射性成因铅的明显加入, 可以反映原始热液中金属物质来源区的 $U-Th-Pb$ 体系及其初始铅同位素组成特征^[6,7]。因此, 通过对矿石铅同位素组成的分析可以逆推源区的 $U-Th-Pb$ 体系特征, 从而获得有关成矿物质来源的信息。应用最广泛的示踪方法主要有以下几种。

收稿日期: 2008-10-08; 改回日期: 2009-11-09

基金项目: 教育部重大科技项目(编号: 308018)资助。

作者简介: 张建芳(1985-), 男, 福建南平人, 硕士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业。通信地址: 湖北省武汉市鲁磨路中国地质大学资源学院; 邮政编码: 430074; E-mail: zhjianfang@126.com

1.1 模式年龄法

模式年龄法是根据 H-H 模式、Doe 的单阶段模式、Stacey 和 Kramers 的正常铅在封闭体系中的二阶段铅增长模式、Cumming 和 Richards 的 ν 值线性增长模式、Faure 的异常铅演化模式等一系列模式得到模式年龄, 将这个矿石铅模式年龄与可能矿源岩的地质年龄进行对比来查明成矿物质源自何种岩石。然而, 各种模式都有严格的适用范围。张理刚^[8,9]指出: 国外许多学者提出的一系列模式都有严格的应用前提条件, 而且设计这些构造模式时并没有考虑中国的资料。因此, 在我们并不知道所研究矿床适合哪种模式的情况下, 随便利用这些模式来解决问题时经常会出现偏差。但在有地质证据或通过其他示踪方法对所研究矿床的铅同位素演化有一定认识以后, 可用通过合理模式计算的模式年龄进行检验或佐证^[10]。

AGSO-CSIRO 铅同位素模式年龄法是在上世纪末由 Sun 和 Carr 等为了解决以往全球模式存在的问题并提高铅同位素模式年龄的准确性而提出的^[11-15]。该方法要求, 不同块体应选择不同的模式, 每个块体内通过独立的年龄证据确定控制点, 也就是以区域地层中的火山岩锆石 U-Pb 年龄作为基准点并确定区域铅同位素演化的一个合适模式。通过建立区域性模式来实现铅同位素模式年龄准确性的提高。

1.2 PbSL 等时线年龄法

单矿物阶段淋滤 Pb-Pb 定年, 简称 PbSL 年龄法。该方法是根据放射性成因铅同位素比铅的稳定同位素优先从被淋溶的岩石或矿物中提取出来的原理, 使用不同酸度的 HBr, HNO₃ 和 HF 将矿化带的蚀变矿物(如绿帘石、石榴石、金红石、角闪石、辉石等)晶体中近于同源、同时形成, 但存在形式、存在区间与赋存状态不同的 U-Pb 体系分阶段释放出来, 这样扩大了不同阶段滤液之间 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的变化, 提高了年龄测定精度。将实验结果投影到 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 如能获得一条等时线, 等时线所代表的年龄即为所分析矿物的形成年龄, 可以提供成矿时代信息, 进而判断与各地质事件或地质体的关系, 并且还可根据投影点在铅同位素组成图上的分布特征来判断成矿流体的来源、成因、及演化历史^[10]。例如, 可根据投影点之间线性关系的好坏来判断矿物中铅是单源还是多源, 如果线性关系较好则暗示分析矿物中铅是单源的; 相反, 则是多源的。各分析样品所获得的等时

年龄相一致, 且各等时线与地球铅增长曲线的交点所代表的年龄相似则暗示成矿流体是均一的。

1.3 Pb 构造模式法

Zartman-Doe 构造模式图^[16]是上世纪 80 年代以来使用最普遍的矿石铅同位素示踪图解法, 至今也是使用频率较高的铅同位素示踪成矿物质来源方法之一。将矿石铅同位素组成投影在铅构造模式图上, 便可根据投影点的分布特征及与不同地质单元平均演化曲线的关系判断成矿物质来源^[17-21]。Zartman 和 Doe 确定了地球上 3 个铅储库, 上地壳、下地壳和上地幔, 造山带铅储库是频繁的造山运动促使地壳和地幔组分的混合形成的。当铅同位素投影点位于造山带增长线上方, 表明矿石铅必然包含上地壳成分或来自于上地壳; 当投影点位于造山带增长线下方, 表明矿石铅必定源于地幔或下地壳; 当投影点位于造山带增长线附近, 表明矿石铅来源于各储库混合源^[17]。储雪蕾等^[22]利用铅构造模式图对内蒙古林西县大井铜多金属矿床成矿物质来源进行示踪, 结果表明: 黑色页岩含有较高的放射成因铅与矿石铅完全不同, 而矿石、基性-超基性岩脉和

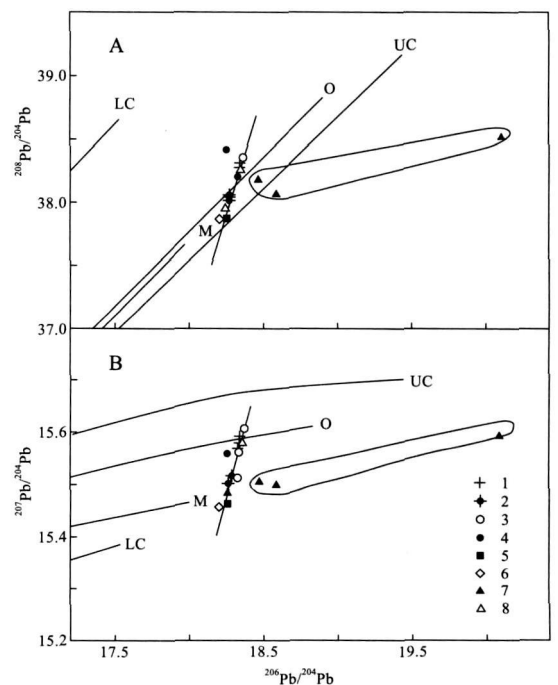


图 1 内蒙古林西县大井铜多金属矿床
铅构造模式图^[22]

Fig. 1 Diagrams of plumbotectonic model

UC, 上地壳 LC, 下地壳 O, 造山带 M, 地幔

1. 黄铁矿 2. 闪锌矿 3. 方铅矿 4. 萤石

5. 玄武玢岩 6. 含橄煌斑岩 7. 黑色页岩 8. 长石

附近花岗岩体的长石铅的比值是相近的,它们在模式图上落在同一条直线上(图1)。这条铅同位素混合线两个端元分别为上地幔和造山带,说明成矿物质来源于深源岩浆,即混合了上地幔与前中生代形成的造山带物质。另外该矿床的矿石硫化物的硫同位素值为 $-1.8 \times 10^{-3} \sim +3.8 \times 10^{-3}$,平均为 $+0.65 \times 10^{-3}$,碳同位素值(约为 -5×10^{-3})也强烈证明了成矿流体中的硫和碳来源于深部岩浆。

需要说明的是,在建立该构造模式时并没有收集中国的同位素数据,因此应用这个模式图讨论中国地质问题时常常会遇到一些矛盾,按模式得出的推论与地质研究结论相悖。该模式的主要缺点表现在:①每一种源区的铅同位素组成实际上是有一定程度变化的,该铅构造模式的每一种源区仅是一条演化线,这条演化线难以代表其变化平均值;②关于造山带铅的意义不确切,它实际上包括了高 μ 值的整合铅,俯冲带的壳幔混合铅,海底热水作用铅和部分沉积与变质铅;③关于下地壳铅也存在着某些错误,它只反映了中等程度变质岩,特别是沉积变质岩的下地壳,许多麻粒岩的铅同位素组成在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上落在上地壳的演化曲线附近^[23]。

1.4 Δ 图解法

与 Zartman-Doe 铅构造模式相比, $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解法考虑了中国的铅同位素资料。研究表明:钍铅的变化以及钍铅与铀铅同位素组成的相互关系对于地质过程与物质来源能提供丰富的信息,朱炳泉^[23,24]根据不同类型岩石铅资料和已知成因的矿石铅资料,给出了不同成因类型矿石铅的 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 变化范围,该图解是将矿石铅或岩石铅的3种同位素表示成同时期地幔的相对偏差。

$$\Delta\beta = [(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{d(t)} / (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{m(t)} - 1] \times 1000$$

$$\Delta\gamma = [(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{d(t)} / (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{m(t)} - 1] \times 1000$$

地幔值按 $\mu = 7.8$ 的似单阶段增长线(代表原始地幔增长线, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 4.04$, $T = 4.57 \text{ Ga}$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0 = 9.307$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0 = 10.294$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0 = 29.476$) 进行计算。年龄 t 可以采用以别的定年方法测定的同时代岩石的年龄,也可以直接应用矿石铅的模式年龄,因为年龄的正确性在这里并不特别重要。在铅构造模式图上可以看到最能反映源区变化的是 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化,而 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 只对成矿时代有灵敏的反映。

1.5 直接对比法

直接对比法是铅同位素示踪最直观,最有效的方法。该方法是将矿区内的矿石、岩浆岩、地层的铅同位素铅投影在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上,观察分析各自的分布特征及相关关系,通过对比来研究矿石铅的来源。如果矿石铅与某种岩石的铅同位素组成相似或成线性关系,而与区内其他岩石的铅同位素组成相差较大,则矿石可能与这种岩石同源或矿质来自这种岩石。张乾等^[25]曾对一些夕卡岩型及岩浆热液型矿床的矿石、岩浆岩及围岩铅同位素进行分析,如佛子冲、香乔等夕卡岩型矿床的矿石铅同位素比值大于岩浆岩铅而小于围岩铅的相应比值,且具有线性分布的特点(图2),说明矿石铅既非全部来自岩浆也非全部来自围岩,应为二者的混合铅;而桓仁、夏山、武山一城门山等夕卡岩型矿床的铅同位素组成中,无论是矿石铅还是岩浆岩铅,同位素组成较为均一,变化很小,并且矿石铅与岩浆岩铅非常接近,与围岩铅差别很大(图3)。矿石铅与岩浆岩铅同位素组成的一致性说明矿石铅是岩浆提供的。

使用直接对比法需要注意的是,一般来说,硫化物及长石中含 U 和 Th 低微,当其形成后 U 和 Th 衰变产生的放射性成因铅数量少,对铅同位素组成的影响可以忽略^[24,25],而沉积围岩含一定量的 U 和 Th,成矿后衰变产生的放射成因铅对铅同位素的对

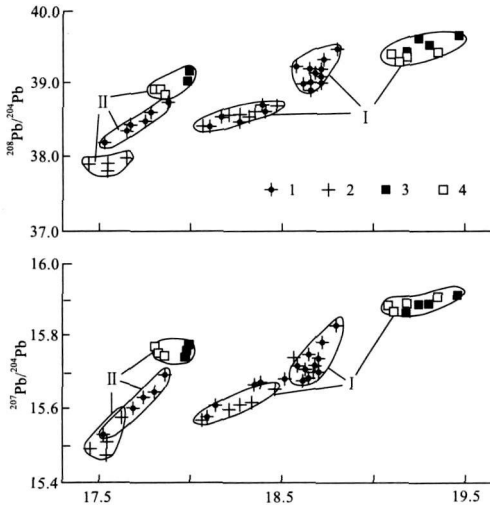


图2 围岩提供部分铅的矿床铅同位素组成^[25]

Fig. 2 Lead isotopic composition of some ore deposits with lead partly derived from wall rocks

1. 矿石 2. 岩浆岩 3. 围岩 4. 校正后围岩
I. 佛子冲; II. 香乔;

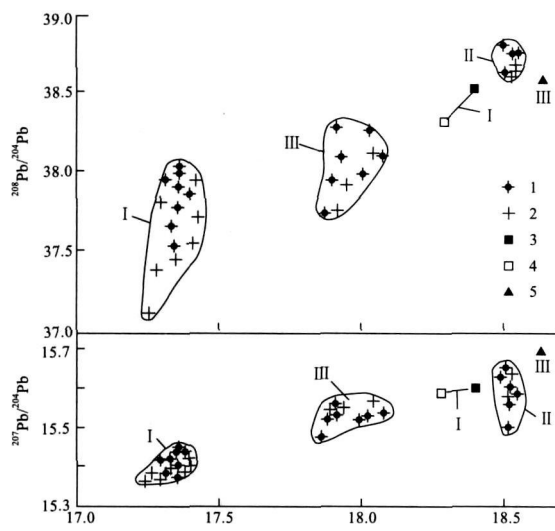


图 3 与围岩无关的矿床铅同位素组成^[25]

Fig. 3 Lead isotopic composition of some ore deposits having nothing to do with wall rocks.

1. 矿石 2. 岩浆岩 3. 围岩 4. 校正后围岩 5. 共生黄铁矿
I. 桓仁; II. 夏山; III. 武山- 城门山;

比会产生一定程度的影响。因此, 用全岩实测值与矿石铅对比会产生不同程度的误差, 须对其进行校正^[25]。

2 矿石全岩 Pb-Pb 等时线定年

U-Th-Pb 等时线不需要像谐和图那样预先进行普通铅校正, 可直接用样品中的测定值进行作图, 并且可以获得进入矿物岩石中的普通铅同位素组成

的信息。一般说来, 由于铀或铅在地质作用过程中易发生丢失, 全岩的 U-Pb 等时线定年往往难以成功, 但 Pb-Pb 等时线应用较广, 尤其是当系统具有高的 U/Pb 比值, 亦即含有足够高的放射成因铅同位素时, 由于²³⁵U/²³⁸U 比值在所有地球物质中是一个常数(1/137.8), 因此²⁰⁶Pb-²⁰⁷Pb 年龄可以不必求出矿物中铀的含量就能计算出来^[26]。

通常一组样品要进行等时线处理必需满足具有相同的时间、相同的初始普通铅同位素组成和保持母子体的封闭这三个基本条件, 然而在系统采样中往往存在这一些受干扰样品而影响年龄的精确度。最近, Tera 研究表明^[27, 28]: 由于铅同位素的仪器测定误差已经非常小了, 若将一组样品数据同时投到²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 与²⁰⁴Pb/²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 两图解得出的两个年龄差大于 $> 1 \times 10^7$ a 时, 这种差别不是由于测试误差造成的, 而是因为该系统样品中存在干扰样品。且将样品投到(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 图解上, 样品之间的差异性就会放大, 对于后期受到干扰的样品就比较容易识别并将其剔除。Tera 对非洲 Belingwe 全岩年龄数据重新进行分析, 将数据点分别投入图 4 中, 得出 2.21 Ga 和 2.23 Ga 两个年龄, 其误差为 2×10^7 a, 说明该系统中存在着后期受到干扰的样品。相同的数据在(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 图解(图 5a)中尽管有干扰样品, 仍表现出一条几乎完美的等时线, 而在(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 图解(图 5b)中可以明显看出数据点比较分散, 虚线框中的样品点很可能是受到后期干扰, 应将其剔除。

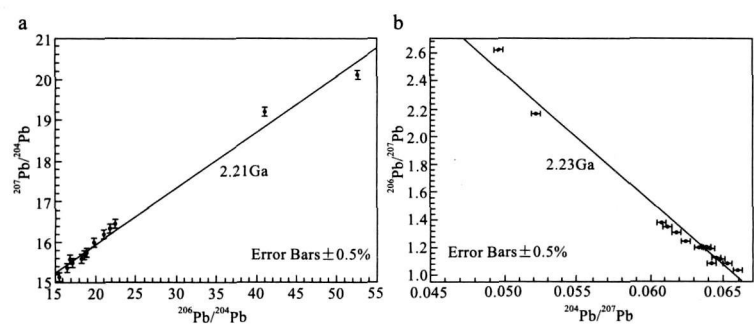


图 4 Belingwe 全岩 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 与 ²⁰⁴Pb/²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 图解^[27]

Fig. 4 The Belingwe whole rock ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb) 与 ²⁰⁴Pb/²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb plot

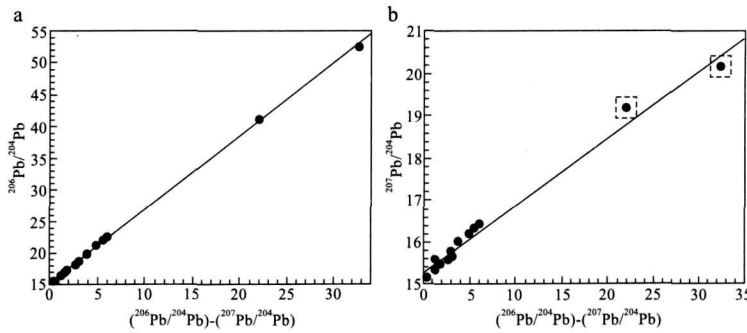


图5 Belingwe 全岩 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解^[27]

Fig. 5 The Belingwe whole rock $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plot

3 铅同位素在找矿勘探中的应用

铅同位素研究不仅可用于矿床成矿物质来源探讨和定年,还可用于化探与找矿评价。前人应用铅同位素在找矿勘探方面已取得很好的效果,主要表现在以下几个方面:①在区域上找矿,圈定大型、超大型矿床产出的远景区;②利用铅同位素打靶法在成矿远景区内优选找矿靶区或在某一具体矿床中圈定矿体产出地段;③铅同位素系统剖面化探法预测隐伏矿深度和评价资源量。

3.1 铅同位素区域找矿

前人根据中国大陆特别是东部地区铅同位素的研究,发现了以下的重要规律:即由新生代玄武岩(特别是几乎未受地壳混染的碱性玄武岩)所确定的地幔铅,显生宙以来,特别是中生代花岗岩的长石铅所代表的壳源铅和具有不同壳幔成因的矿石铅,三者具有消长同步变化,严格受不同构造块体制约^[29]。根据铅同位素组成特征,朱炳泉^[24]把中国大陆划分为华南、扬子、华北、北疆、小兴安岭—佳木斯和西藏等6个铅同位素省。各同位素省之间常常存在地球化学场的急变带,这些急变带与大型和超大型矿床的产出位置密切相关,从而可以用铅同位素省划分来进行化探找矿和预测评价。研究表明,在特定的构造块体与成矿区(带)中,不同类型的矿种与不同的矿床类型具有特定的铅同位素组成^[24,30]。何琼^[31]研究发现中国南方金顶、个旧、柿竹园等超大型矿床产出位置与地球化学急变带的走势密切相关,主要分布在:①急变带等值线分布高密度但又有

一定宽度的区域;②急变带的拐弯处;③急变带的两侧 V_1 值所形成大体对称的封闭圈等位置,从而可以确定进一步找矿重点应为这些铅同位素 V_1 值的急变带附近(如中心线、收缩处、转折处、两侧的封闭圈等)。因此,可以通过铅同位素地球化学急变带来圈定成矿远景区。

3.2 铅同位素优选找矿靶区

铅同位素在次生过程中不易受到所在系统物理化学条件变化带来的影响,因而在铁帽、土壤和风化基岩中原来物质的铅同位素特征能够保持不变。具有复杂演化历史并与变质作用、岩浆侵入有关的矿床,以及由Fe和贱金属元素表生作用而形成的铁帽和无矿围岩等,铅同位素往往具有不均一性。因此,铅同位素的特征有助于判定由不同地质作用引起的类似地球化学异常。通过对成矿区已知矿床铅同位素的研究,建立本区找矿的靶标值,根据预测区地质情况布置采样,分析其铅同位素组成,并与所建立的找矿靶标值进行对比,接近已知矿区的值即中靶,根据中靶的几率并参考地质成矿因素来选择最佳的找矿靶区^[31]。陈好寿等^[32]在对广东玉水—银矢富铜多金属矿带中玉水式铜矿床与银矢式铅锌矿床的研究中采用 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 特征值作为找矿标志,把 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.15 \pm 0.15$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} = 1.155 \pm 0.005$ 作为玉水式铜矿的找矿标志(靶标值),把 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.65 \pm 0.05$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} = 1.19 \pm 0.01$ 作为银矢式铅锌矿的找矿标志(靶标值),对若干预测区进行铅同位素打靶,其同位素预测结果与物、化探预测结果一致。然而,预测区找矿靶标值的选择是非常重要的,在对海南不磨金矿区铅同位素研究分析,前人认为与金成矿关系密切的

铅同位素示踪指标是 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 而何琼^[31]等采用灰色关联度分析和滑动滤波的方法对资料重新分析认为应当选用 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 来进行金矿的铅同位素示踪。

3.3 隐伏矿深度预测和资源量评价

实践表明, 利用铅同位素优选找矿靶区对预测区的宏观评价具有一定意义, 然而对于具体隐伏矿的预测结果并不理想。朱炳泉等^[33]在新疆阿尔泰地区、芮宗瑶等^[34]在辽宁关门山(柴河)铅锌矿、黄斌^[35]在海南地区的应用表明, 尽管打靶法对预测区的宏观评价有一定意义, 然而靶标的代表性会影响评价结果, 同时贫铅矿体的放射成因铅的影响, 也使对结果的解释复杂化。特别是铜多金属矿床, 由于贫钍-铀与贫铀-铅特征往往成功率较低。因此, 铅同位素方法在化探评价和找矿预测中的应用受到了极大的限制。

自上世纪末开始, 常向阳^[36, 37], 李中兰、崔学军等^[38, 39]等就利用系统剖面法先后对东川铜矿床、金平龙脖河铜矿、北祁连西段寒山金矿和甘肃省鹰嘴山金矿开展铅同位素化探的尝试, 并取得成功。其基本原理是由于岩石圈中U含量与U/Pb值的变化具有明显随深度衰减的特征, 这是壳幔演化引起的U-Th-Pb同位素体系分异的结果^[40]。无论是岩浆热液型、热水沉积型, 还是改造成矿型的大中型矿床, 成矿物质来源普遍具有壳幔相互作用特征, 成矿作用引起的元素分异, 特别是U、Pb的分异要比地壳大得多。具有矿化显示的矿化前缘和浅源矿其铅同位素值很高且变化范围很大, 而到达主矿体时则变得十分稳定, 并与所属块体的地壳、地幔平均铅同位素组成相一致。根据这一基本原理, 崔学军、朱炳泉等建立了成矿带隐伏矿深度预测的理论模型, 并提出了隐伏系数的概念用于隐伏矿资源量的预测^[29, 37]。

4 结论

尽管铅同位素在地壳、地幔中如何演化仍困扰着人们, 需进一步探讨和研究。但根据现有的铅同位素资料在矿床成矿物质来源研究、定年以及找矿勘探中可得到较好应用:

(1) 铅同位素示踪成矿物质来源具有很好的作用, 其主要方法有模式年龄法、铅构造模式法, $\Delta\beta$ $\Delta\gamma$ 图解法以及直接对比法。在应用中, 应具体分析

实际地质问题而选择方法, 其中直接对比法是矿石铅示踪成矿物质来源的首选方法, 并可同其他同位素体系, 如锶、钼、氧、硫等配合使用, 以获得更好的示踪效果。

(2) 在系统样品中经常存在后期受干扰的样品, 通过 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解可以将其成功剔除。因此在对一些无法找到合适矿物进行直接成矿时代定年的矿床, 尤其是一些金属硫化物矿床, 矿石Pb-Pb等时线定年表现出其优越性。

(3) 铅同位素省的划分确定了不同地球化学块体成矿专属性背景和铅同位素化探背景值, 为铅同位素在勘探找矿方面的应用奠定了基础。尽管目前铅同位素方法应用于矿床化探评价的理论依据还不够成熟, 但采用铅同位素打靶法和系统剖面化探法在化探找矿和隐伏矿深度预测和资源量评价方面已经获得了成功。因此铅同位素方法在找矿勘探中具有现实意义, 可以进一步的深入研究和应用, 尤其是对已开发矿山的可持续发展评估以及危机矿山的深部潜力评价。

参考文献:

- [1] Bakera J, Peatea D, Waighta T, *et al.* Pb isotopic analysis of standards and samples using a ^{207}Pb - ^{204}Pb double spike and thallium to correct for mass bias with a double-focusing MG-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211: 275-303.
- [2] Gurenko A A, Hoernle K A, Hauff F, *et al.* Major, trace element and Nd-Sr-Pb-O-Hf-Ar isotope signatures of shield stage lavas from the central and western Canary islands: Insights into mantle and crustal processes[J]. *Chemical Geology*, 2006, 233: 75-112.
- [3] Bolhar R, Kamber B S, Collerson K D. U-Th-Pb fractionation in Archean lower continental crust: Implications for terrestrial Pb isotope systematics[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 254: 127-145.
- [4] 张锦丽, 袁洪林, 高山, 等. 地质样品中 Pb 同位素分析的高效酸淋洗流程[J]. *地球科学——中国地质大学学报.*, 2008, 33: 46-56.
- [5] 沈渭洲. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1987.
- [6] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 59-80.
- [7] 张理刚. 长石铅和矿石铅同位素组成及其地质意义[J]. *矿床地质*, 1988, 7(2): 55-64.
- [8] 张理刚. 同位素地质研究现状与展望[J]. *地质与勘探*, 1992

- 28(4): 21-29.
- [9] 张理刚, 刑凤鸣. 安徽中生代花岗岩铅同位素组成与铅同位素省划分[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 105-114.
- [10] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 73-81.
- [11] Sun S S, Page R W, Carr G R. Lead-isotope-based stratigraphic correlations and ages of Proterozoic sediment-hosted Pb-Zn deposits in the Mount Isa Inlier[J]. Australian Geological Survey Organisation Research Newsletter, 1993, 20: 1-2.
- [12] Sun S S, Carr G R, Page R W. A continued effort to improve lead isotope model ages[J]. Australian Geological Survey Organisation Research Newsletter, 1996, 24: 19-20.
- [13] Carr G R, Sun S S. Lead isotope models applied to Broken Hill style terranes—syngenetic vs epigenetic metallogenesis[M]. Proceedings of a workshop on “New Developments in Broken Hill Type Deposits” CODES, University of Tasmania, 1996: 77-87.
- [14] Graham R Carr, Sen-su Sun, Rodney W Page, *et al.* Recent developments in the use of lead isotope model ages in Proterozoic terranes[C]. In: Townsville MIC’96: New Developments in Metallogenic Research, 1996: 33-35.
- [15] 常向阳. 铅同位素研究新进展——“双稀释剂”测定方法和“AGSO-CSIRO”模式年龄[J]. 地质地球化学, 1999, 27(2): 93-98.
- [16] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135-162.
- [17] Stacey J S, Hedlund D C. Lead-isotope compositions of diverse igneous rocks and ore deposits from southwestern New Mexico and their implications for early Proterozoic crustal evolution in the western United States[J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94: 43-57.
- [18] Puig A. Geologic and metallogenic significance of the isotopic composition of lead in galenas of the Chilean Andes[J]. Economic geology, 1988, 83: 843-858.
- [19] Townley B K, Godwin C I. Isotope characterization of lead in galena from ore deposits of the Aysn Region, southern Chile[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36: 45-57.
- [20] Stendal H. Contrasting Pb isotopes of Archaean and Palaeoproterozoic sulphide mineralisation, Disko Bugt, central West Greenland[J]. Mineralium Deposita, 1998, 33: 255-265.
- [21] Kamona A F, Luvuque J, Friedrich G, *et al.* Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damara-Lufilian Fold Belt of Central Africa[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34: 273-283.
- [22] 储雪蕾, 霍卫国, 张翼. 内蒙古林西县大井铜多金属矿床的硫、碳和铅同位素及成矿物质来源[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 66-74.
- [23] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社: 1998.
- [24] 朱炳泉. 矿石 Pb 同位素三维空间拓扑图解用于地球化学省和矿种区划[J]. 地球化学, 1993, (3): 209-216.
- [25] 张乾, 潘家永, 邵树勋. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 地球化学, 2000, 29(3): 231-238.
- [26] 李发源, 顾雪祥, 付绍洪, 等. MVT 铅锌矿床定年方法评述[J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(3): 163-167.
- [27] Fouad Tera. Lead isotope planetary profiling (LIPP): Summary depiction of Earth’s many reservoirs[J]. Chemical Geology, 2006, 233: 1-45.
- [28] Fouad Tera. A lead isotope method for the accurate dating of disturbed geologic systems: Numerical demonstrations, some applications and implications[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta., 2003, 67(19): 3687-3715.
- [29] 崔学军, 朱炳泉. 铅同位素找矿方法研究现状与进展综述[J]. 甘肃地质学报, 2005, 14(2): 31-37.
- [30] Zhu B Q. Geochemical evidence for The southern China block being a part of Gondwana[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1994, 9: 319-324.
- [31] 何琼, 李向阳. 铅同位素地球化学示踪进展[J]. 地质找矿论丛, 1998, 13(3): 82-85.
- [32] 陈好寿. 成矿作用年代学及同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-239.
- [33] 朱炳泉, 陈民扬. 新疆北部铅同位素省及部分层控矿床成因与化探评价[C]. 见: 涂光炅. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993: 39-52.
- [34] 芮宗瑶, 李宁, 王龙生. 关门山铅锌矿床——盆地热卤水成矿及铅同位素打靶[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 129-162.
- [35] 黄斌. 在琼西蚀变岩型金矿勘探中用铅同位素方法评价化探异常的研究[C]. 见: 第五届全国勘查地球化学学术讨论会论文摘要. 北京: 地质出版社, 1993: 66-67.
- [36] 常向阳, 朱炳泉. 东川铜矿床同位素地球化学研究: I. 地层年代与铅同位素化探应用[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 44-50.
- [37] 常向阳, 朱炳泉, 邹日. 铅同位素系统剖面化探与隐伏矿床预测评价: 以金平龙脖河铜矿为例[J]. 中国科学(D), 2000, (1): 33-39.
- [38] 李中兰, 崔学军, 刘红英, 等. 铅同位素方法在隐伏矿深度与资源量定量预测中的应用研究——以北祁连西段寒山金矿为例[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 441-451.
- [39] 崔学军, 李中兰, 朱炳泉, 等. 铅同位素在矿产资源评价中的应用——以甘肃省鹰嘴山金矿区为例[J]. 矿床地质. 2008, 27(1): 88-100.
- [40] 朱炳泉. 固体地球科学的同位素体系理论[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 321.

- and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos.*, 1990, 26: 115-134.
- [14] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 92-103.
- [15] 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2683-2698.
- [16] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of petrology*, 1984, 25: 956-983.
- [17] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20: 641-644.

STUDY ON THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS, GENETIC TYPE AND TECTONIC SETTING OF MAGMATIC ROCKS IN YUANBAOSHAN DISTRICT, INNER MONGOLIA

ZHANG Shu-gen, LIU Nan, DING Jun, GAO Xiang, WEI Li, YANG Hui-fang

(College of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha, Hunan, China, 410083)

Abstract: Comparison of Yuanbaoshan alkali-adamellite granite with various type of granite at home and abroad and the discrimination diagrams show that the Yuanbaoshan granite belongs to A-type granite. It is rich in silicon and alkali, and poor in calcium and magnesium characterized by a low valley pattern of trace elements including Sr, P, Eu, and Ti and right decline REE pattern with high LREE, a typical seagull style. All of these characteristics comply with A-type granite. And it is discriminated the A-type granite in the Eby tectonic diagrams. Moreover, the authors consider that it may be related to the orogenic uplift of the continent.

Key Words: granite; geochemical characteristics; genetic type; tectonic setting; Yuanbaoshan district; Inner Mongolia

(上接第 328 页)

A SUMMARY OF THE APPLICATION OF LEAD ISOTOPE TO STUDY ON ORE DEPOSITS AND ORE EXPLORATION

ZHANG Jian-fang, ZHANG Gang-yang

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The lead isotope has been widely used in tracing of the ore source material including model age method, PbSL isochron age method, geotectonic model method, $\Delta^{206}\text{Pb}/\Delta^{207}\text{Pb}$ graphic method, and the direct comparison method. Tracing the source material only by model age value has been phased out and the model age value must be calibrated with that calculated from the rational model. China geology was not involved in the Pb isotope geotectonic regime and now is questioned in China. $\Delta^{206}\text{Pb}/\Delta^{207}\text{Pb}$ graphic method involves the geology of China but is under testing and verification. The direct comparison method is the most efficient and intuitive tracing method. In addition, the whole ore Pb-Pb isochron dating has been more accurate and applied successfully in a number of deposits through removing the late interference factors from the sampling system. Results of Pb isotope researches have been applied to geochemical exploration and ore potential evaluation, especially for application of the systematic Pb isotope geochemical profile method (three-dimensional projection topology value V_1 and V_2) to the prediction of concealed ore resources and deep blind ore bodies.

Key Words: lead isotopes; ore-forming material source; isochron dating; ore predicting and evaluating