

文章编号 :0258-7106 (2005) 05-0561-06

两阶段铅演化体系 μ_1 值的计算*

韩发,李振清

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

摘要 异常铅二次等时线是普通铅同位素地质学研究中非常重要的一个课题。在解释二次等时线时,当铅源岩年龄确定后,如何计算铅源岩的 μ 值是个经常遇到的问题。文章详尽地介绍了计算 μ_1 值的 3 种方法:①先求 μ_2 法;②先求 T164 法;③图解法。对这 3 种方法分别以实例予以说明。

关键词 地球化学;铅同位素;二次等时线; μ_1 值计算;地质实例

中图分类号:P597+.2

文献标识码:A

对于两阶段铅演化体系,当第二阶段铅源岩年龄(或成岩年龄/变质年龄)确定后,如何计算 μ_1 值是个经常遇到的问题。与单阶段铅演化体系相比,两阶段演化体系 μ_1 值的计算复杂得多,并有几种不同的方法可供选择。为方便大家使用,现分述如下。

1 先求 μ_2 法

1.1 对于 Stacey-Kramers (S-K) 模式 (Stacey et al., 1975)

对于 S-K 模式,两阶段铅演化体系铀铅的铅同位素组成可由以下方程表示:

$$T264 = a_0 + \mu_1(e^{\lambda_1 t_0} - e^{\lambda_1 t_1}) + \mu_2(e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_1 t_2}) \dots \dots \dots (1.1)$$

$$T274 = b_0 + \frac{\mu_1(e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}) + \mu_2(e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_2 t_2})}{137.88} \dots \dots \dots (1.2)$$

式中 T264 和 T274 分别为 $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ 和 $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ 的实测值; t_0 为地球年龄; t_1 为成岩-成矿物质来源区源岩年龄; t_2 为矿化年龄; λ_1 为 ^{238}U 的衰变常数; λ_2 为 ^{235}U 的衰变常数; $a_0 = (\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_0$, $b_0 = (\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_0$, 均为陨石或地球初始铅同位素组成; μ_1 为第一阶段演化体系的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 比值; μ_2 为第二阶段演化体系的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 比值。

当 $t_0 = 3.70 \times 10^9 \text{ a}$, $a_0 = 11.152$, $b_0 = 12.998$

时,适用于 S-K-II 模式;当 $t_0 = 4.57 \times 10^9 \text{ a}$, $a_0 = 9.307$, $b_0 = 10.294$ 时,适用于 S-K-I 模式; $\lambda_1 = 0.155125 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, $\lambda_2 = 0.98485 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 。

整理(1.1)、(1.2)式,则分别得:

$$\mu_1 = \frac{T264 - a_0}{e^{\lambda_1 t_0} - e^{\lambda_1 t_1}} - \mu_2 \frac{e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_1 t_2}}{e^{\lambda_1 t_0} - e^{\lambda_1 t_1}} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\mu_1 = 137.88 \times \frac{T274 - b_0}{e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}} - \mu_2 \frac{e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}}{e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}} \dots \dots \dots (2.2)$$

设: $\frac{T264 - a_0}{e^{\lambda_1 t_0} - e^{\lambda_1 t_1}} = A$, $\frac{e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_1 t_2}}{e^{\lambda_1 t_0} - e^{\lambda_1 t_1}} = B$, $137.88 \times$

$\frac{T274 - b_0}{e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}} = C$, $\frac{e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}}{e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}} = D$, 并将 A、B、C、D 分别

代入方程式(2.1)、(2.2), 则得

$$\mu_2 = \frac{A - C}{B - D} \dots \dots \dots (3)$$

方程(3)中各参数均已知,故 μ_2 可求。已知 μ_2 后,将 μ_2 代入方程式(2.1)或(2.2), 则 μ_1 可求。

1.2 对于 Cumming-Richards (C-R) 模式 (Cumming et al., 1975)

对于 C-R 模式,两阶段铅演化体系铀铅的铅同位素组成可由以下方程表示:

$$T264 = a_0 + \mu_p \{ e^{\lambda_1 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_1})] - e^{\lambda_1 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_1})] \} + \mu_2 (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_1 t_2}) \dots \dots \dots (4.1)$$

$$T274 = b_0 + \frac{\mu_p}{137.88} \{ e^{\lambda_2 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] -$$

* 第一作者简介 韩发,男,1939年生,研究员,从事矿床地质-地球化学研究工作。

收稿日期 2005-08-15;改回日期 2005-09-01。李岩编辑。

● 该公式由 David R. Nelson 提供。2002. 私人通信。其来龙去脉及推导过程由作者自己完成。

$$e^{\lambda_1 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_1})] + \frac{\mu_2}{137.88} (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}) \dots \dots (4.2)$$

ϵ 是 $(^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})_t$ 或 $(^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb})_t$ 比值随时间变化进行放射性衰变校正时的比率系数,其量纲为时间的倒数; μ_p 为某确定演化体系幔源铅现代的 μ 值, $t_0 = 4.509 \times 10^9 \text{ a}$, $a_0 = 9.307$, $b_0 = 10.294$, $\epsilon = 0.05 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, $\lambda_1 = 0.155125 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, $\lambda_2 = 0.98485 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 。

将(4.1)、(4.2)式移项、分解,则得:

$$\mu_p = \frac{T264 - a_0}{e^{\lambda_1 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_1})] - e^{\lambda_1 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_1})]} - \frac{\mu_2 \cdot (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_2})}{e^{\lambda_1 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_1})] - e^{\lambda_1 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_1})]} \dots \dots (5.1)$$

$$\mu_p = \frac{137.88 \times (T274 - b_0)}{e^{\lambda_2 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] - e^{\lambda_2 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_2})]} - \frac{\mu_2 \cdot (e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_1 t_2})}{e^{\lambda_2 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] - e^{\lambda_2 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_2})]} \dots \dots (5.2)$$

设: $\frac{T264 - a_0}{e^{\lambda_1 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_1})] - e^{\lambda_1 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_1})]} = A$,
 $\frac{e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}}{e^{\lambda_1 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_1})] - e^{\lambda_1 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_1})]} = B$,
 $\frac{137.88 \times (T274 - b_0)}{e^{\lambda_2 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] - e^{\lambda_2 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_2})]} = C$,
 $\frac{e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_1 t_2}}{e^{\lambda_2 t_0} [1 - \epsilon(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] - e^{\lambda_2 t_1} [1 - \epsilon(t_1 - \frac{1}{\lambda_2})]} = D$, 将

A、B、C、D 分别代入(5.1)、(5.2)式,则得方程式(3), μ_2 可求。已知 μ_2 后,代入(5.1)或(5.2),则 μ_p 可求,进而:

$$\mu(t_0) = \mu_p (1 - \epsilon t_0) \dots \dots (6)$$

$$\mu(t_1) = \mu_p (1 - \epsilon t_1) \dots \dots (7)$$

1.3 实例:Kirkland Lake 地区的脉状矿床

Kirkland Lake 位于加拿大艾安略省。该区脉状矿化产在不同成分的太古宙火山岩和沉积岩层位中,大部分矿脉富含方铅矿、闪锌矿,脉石矿物主要

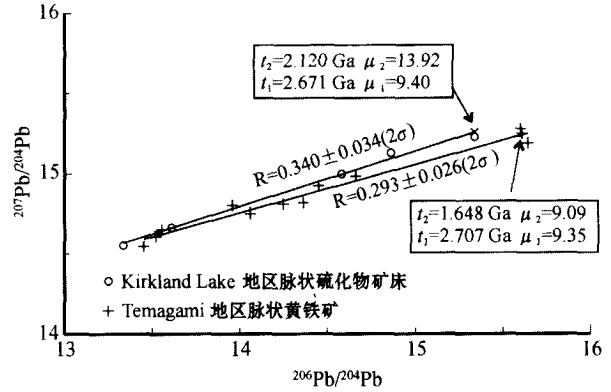


图1 Kirkland Lake 地区脉状硫化物矿床方铅矿及 Temagami 矿山公路脉状黄铁矿的铅同位素组成 (据 Franklin 等,1983 资料制作)

Fig.1 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vers. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isochron plot. Open circles denote galena from Kirkland Lake vein sulfide ores, cross symbols denote pyrite from Temagami Mine Road pyrite occurrence, in Canada (the diagram were constructed from original data taken from Franklin et al., 1983)

是石英、方解石。5 个代表性矿床的铅同位素数据点构成了一条二次等时线,其斜率 $R = 0.340 \pm 0.034 (2\sigma)$ (见图 1)。区域研究证明,该区的脉状矿化是由 Nipissing 辉绿岩侵入的热事件引起的,因此其矿化年龄 $t_2 = 2120 \text{ Ma}$ 。用矿化年龄及二次等时线斜率,求出铅源岩年龄为 2671 Ma (Franklin et al., 1983)。5 个代表性矿床中, Benoit Tp 含放射性成因铅最高, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (T264) = 15.34, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (T274) = 15.246,用这些参数,经计算(用 S-K 两阶段模式): $A = 15.98975$, $B = 0.47335$, $C = 12.72326$, $D = 0.23863$ 。将 A、B、C、D 代入方程式(3),则 $\mu_2 = \frac{15.98975 - 12.75722}{0.47335 - 0.23863} = 13.92$,将 μ_2 代入方程式(2.1),则

$$\mu_1 = \frac{15.34 - 11.152 - 13.77(1.51337 - 1.38939)}{1.77529 - 1.51337} = 9.40$$

此处计算获得的 μ_1 值与 Kirkland Lake 地区同类矿床的 μ_1 值大约为 10 很接近 (Franklin et al., 1983)。

2 先求 T164^②法

2.1 对于 S-K 模式

上述两阶段铅演化体系方程式(1.1)、(1.2)可

① 因该点明显偏离异常铅二次等时线,若以 T264 值为准,则 T274 应取二次等时线上相应点的坐标值,即 $T274 = R \cdot T264 + Y$ (见前述)。
 ② $T164 = (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_1}$, $T174 = (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t_1}$,即为第二阶段演化体系起点处(时间为 t_1)的铅同位素组成。

以改写成以下形式：

$$T164 = a_0 + \mu_1(e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}) \dots\dots\dots (8.1)$$

$$T264 = T164 + \mu_2(e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}) \dots\dots\dots (8.2)$$

$$T174 = b_0 + \frac{\mu_1}{137.88} \cdot (e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}) \dots\dots\dots (9.1)$$

$$T274 = T174 + \frac{\mu_2}{137.88} \cdot (e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}) \dots\dots\dots (9.2)$$

将方程式(8.1)及(9.1)和(8.2)及(9.2)分别移项变换后联立,则得:

$$\frac{T174 - b_0}{T164 - a_0} = \frac{1}{137.88} \times \frac{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}} \dots\dots\dots (10.1)$$

$$\frac{T274 - T174}{T264 - T164} = \frac{1}{137.88} \times \frac{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}}{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}} \dots\dots\dots (10.2)$$

设: $\frac{1}{137.88} \times \frac{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}} = A, \frac{1}{137.88} \times \frac{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}}{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}} = B$, 并将 A、B 分别代入方程式(10.1)、(10.2), 则得:

$$T174 - b_0 = A \cdot T164 - A \cdot a_0 \dots\dots\dots (11.1)$$

$$T274 - T174 = B \cdot T264 - B \cdot T164 \dots\dots\dots (11.2)$$

将方程(11.1)、(11.2)相加合并同类项, 则得:

$$T164 = \frac{T274 - B \cdot T264 - (b_0 - A \cdot a_0)}{A - B} \dots\dots\dots (12)$$

方程式(12)中各参数均已知, 故 T164 可求。已知 T164, 则

$$\mu_1 = \frac{T164 - a_0}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}} \dots\dots\dots (13), \mu_2 = \frac{T264 - T164}{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}} \dots\dots\dots (14)$$

2.2 对于 C-R 模式

有关公式推导过程与上述相似, 最后结果亦是:

$$T164 = \frac{T274 - B \cdot T264 - (b_0 - A \cdot a_0)}{A - B}, \text{其中}$$

$$A = \frac{e^{\lambda t_0} [1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1} [1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]}{137.88 [e^{\lambda t_0} [1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1} [1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]}}$$

$$B = \frac{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}}{137.88(e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2})}, \text{已知 T164 后, 则}$$

$$\mu_p = \frac{T164 - a_0}{e^{\lambda t_0} [1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1} [1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]} \dots\dots\dots (15)$$

$\mu(t_0)$ 、 $\mu(t_1)$ 、 μ_2 可分别用方程式(6)、(7)、(14)求得。

2.3 实例: Temagami 矿山公路脉状黄铁矿

Temagami 黄铁矿化区位于加拿大安大略省 Cobalt-Sudbury 地区, 矿体呈脉状产于太古宙剪切变形的安山岩中。14 件黄铁矿样品(包括淋滤相、残留相)铅同位素资料在常规铅同位素组成图解上构成一条二次等时线(图 1)。该等时线斜率 $R = 0.293 \pm$

$0.026(2\sigma)$, 已知矿化年龄为 1.648 Ga, 求出铅源岩年龄为 2.707 Ga (Franklin et al., 1983)。全部样品中, 含放射性成因铅最高的 3 件样品平均铅同位素组成是: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(T264) = 15.617, ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(T274) = 15.230$ 。经计算(据 S-K-II 模式): $A = 0.68280, B = 0.29299, T164 = 13.522$ 。将 T164 代入方程式

$$(13)、(14), \text{则 } \mu_1 = \frac{13.522 - 11.152}{0.25344} = 9.35; \mu_2 =$$

$$\frac{15.617 - 13.522}{0.29299} = 9.09。$$

以上计算结果表明, 含放射性成因铅最高的那组样品的 μ_2 与其岩源区的 μ_1 值几乎相同。这说明, 前者亦具正常铅性质, 它们在时间 $t_1 \sim t_2$ (2.707 ~ 1.648 Ga) 的演化过程中, 没有其他来源铅的加入。在 t_2 时, 放射性成因铅被活化出来, 并以不同比例与来源区的正常铅相混合, 形成一组异常铅。

3 图解法

获得异常铅二次等时线后, 以上方法都是先求铅源岩年龄, 然后再求 μ_1 值。其实, 可以设法先求铅源岩 μ_1 值, 而后再求铅源岩(或成岩/变质)年龄。Moorbath 曾用算法先求 μ_1 值, 其作法是: 让初始铅增长曲线与异常铅等时线相交, 通过计算出交点时间为 0 Ma 者, 此时该增长曲线的 μ 值即为铅源岩的 μ_1 值 (Moorbath et al., 1969)。事实上, 用图解法求 μ_1 值更简便、直观, 现讨论如下:

图 2 是苏格兰西北地区 Lewisian 片麻岩全岩样品的 Pb/Pb 图解, 其中直线 A 是样品数据点构成的异常铅等时线。从图 2 可见, 异常铅增长曲线 ($\mu_2 = 12.164$) 与初始铅增长曲线 ($\mu_1 = 7.66$) 及异常铅等时线相交于 P 点, 此点即为异常铅源岩铅同位素组成的位置点。换句话说, 在图 2 中, 异常铅源岩的数据点即位于异常铅增长曲线上, 也位于初始铅增长曲线上。

对于异常铅增长曲线来讲, 其演化轨迹可由方程式(16.1)、(16.2)表示:

$$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{t_2} = \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{t_1} + \mu_2 \cdot (e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}) \dots\dots\dots (16.1)$$

$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{t_2} = \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{t_1} + \frac{\mu_2}{137.88} \cdot (e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}) \dots\dots\dots (16.2)$$

随着 μ_2 的变化, 方程式(16)将给出一组以 P 点为起点的发射增长曲线。对于全岩样品, 上述方程中 $t_2 = 0 \text{ Ma}$, 故直线 A 即为这组增长曲线的零等时

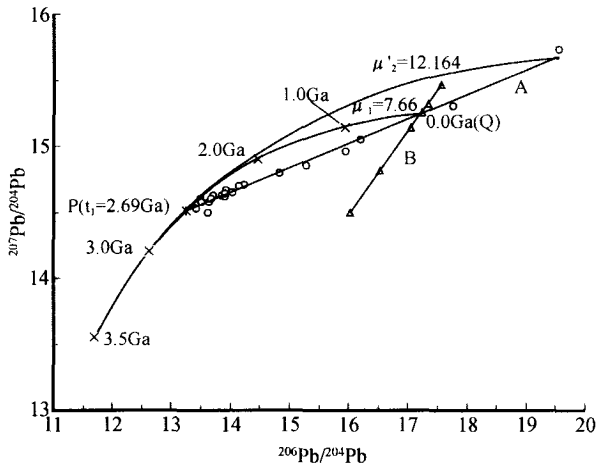


图 2 苏格兰西北部 Lewisian 片麻岩的 Pb/Pb 图解(据 Chapman and Moorbath, 1977 资料制作),所用的初始参数: $t_0 = 4.57 \times 10^9$ a, $a_0 = 9.307$, $b_0 = 10.294$, $\lambda_1 = 0.155125 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, $\lambda_2 = 0.98485 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$

Fig.2 Pb/Pb plot of Lewisian gneisses of north-west Scotland (the diagram were constructed from original data taken from Chapman and Moorbath, 1977)

线(对于硫化物类的样品, $t_2 > 0$ Ma, 详见后述)。同理,对于初始铅增长曲线来讲,其演化轨迹可由方程式(17.1)、(17.2)表示:

$$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_t = a_0 + \mu_1 \cdot (e^{\lambda_1 t_0} - e^{\lambda_1 t}) \dots \dots \dots (17.1)$$

$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_t = b_0 + \frac{\mu_1}{137.88} \cdot (e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t}) \dots \dots \dots (17.2)$$

随着 μ_1 的变化,方程式(17)将给出一组以 t_0 点为起点(在图 2 中未表示)的发射增长曲线。设 $t = 0$ Ma,则直线 B 即为这组增长曲线的零等时线,也即地球年龄线($t > 0$ Ma 时,见后述)。若取地球年龄 $t_0 = 4.57$ Ga,其斜率 $R = 0.627$,若 $t_0 = 4.55$ Ga,其斜率 $R = 0.620$ 。

两条零等时线(直线 A 与 B)的交点 Q 即能满足方程式(16)的条件,也能满足方程式(17)的条件,也就是说,该点即位于异常铅增长曲线上,同时也位于初始铅增长曲线上。用图解法,Q 点坐标可求。已知 Q 点的铅同位素组成($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.211$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.243$)及初始铅的相应参数(见图 2 注),则可用方程式(17)求出初始铅增长曲线的 $\mu_1 = 7.66$ 。已知 μ_1 后,异常铅等时线与初始铅增长曲线下交点的时间即为异常铅源岩的形成时间($t_1 = 2.689$ Ga),该交点的坐标($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 13.246$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 14.514$)即为铅源岩的铅同位素组成。

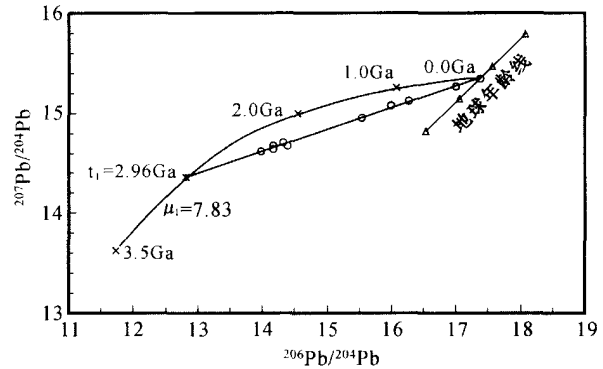


图 3 Lewisian 北部地区灰色片麻岩的 Pb/Pb 图解(据 Whitehouse and Moorbath, 1986 资料制作),所用相关参数同图 2

Fig.3 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vers. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isochron plot and μ_1 growth curve of the grey gneiss from northern region of Lewisian of north-west Scotland (the diagram were constructed from original data taken from Whitehouse and Moorbath, 1986)

总之,用图解法求 μ_1 值的关键在于确定 Q 点。从图 2 可见,异常铅等时线与地球年龄线的交点就是 Q 点。

图 3 是 Lewisian 北部地区角闪岩相灰色片麻岩全岩样品的 Pb/Pb 图解。其中,地球年龄线与样品数据点构成的等时线相交于一点,其坐标值为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.381$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.345$ 。用这组铅同位素组成及方程式(17),求出铅源岩的 $\mu_1 = 7.83$ 。初始铅增长曲线与异常铅等时线下交点时间 $t_1 = 2.953$ Ga。这个年龄与 Sm-Nd 法全岩等时线年龄 [(2.920 ± 0.5) Ga] 基本是一致的。

图 2 与图 3 资料对比表明,不同地区 Lewisian 片麻岩来源区的 μ 值几乎相同,但其时间不同。前者($t_1 = 2.689$ Ga)可能是苏格兰西北部地区麻粒岩相变质作用的峰值时间,后者($t_1 = 2.953$ Ga)被认为是灰色片麻岩原岩从地幔中分离出来的时间,两者相差大约 240 Ma(Whitehouse et al., 1986)。

现在讨论 $t_2 > 0$ Ma 时,作图法求 μ_1 值的具体情况。为了便于验证数据的可靠性,在此特意引用前面曾用过的 Te magami 矿山公路黄铁矿样品铅同位素资料。图 4 是用这组资料制作的 Pb-Pb 图解。研究证明,该区黄铁矿的矿化年龄 $t_2 = 1.648$ Ga (Franklin et al., 1983)。据方程式(17),设 $t = 1.648$ Ga,计算出在不同 μ_1 值条件下的 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 值。这些数据点构成一条等

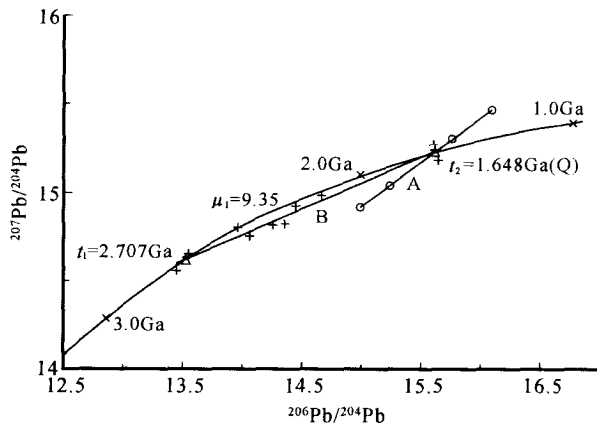


图 4 Temagami 矿山公路脉状黄铁矿的铅同位素组成及 μ_1 增长曲线(据 Franklin 等, 1983 资料制作)

Fig. 4 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vers. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isochron plot and μ_1 growth curve of pyrite data from Temagami Mine Road pyrite occurrence, in Canada (the diagram were constructed from original data taken from Franklin et al., 1983)

时线(直线 A), 该等时线即为时间 $t = 1.648 \text{ Ga}$ 的初始等时线。直线 B 是异常铅的二次等时线, 其上任何一点的形成时间都等于 1.648 Ga 。因此, 在时间 $t_2 = 1.648 \text{ Ga}$ 时, 在 μ_2 值改变的条件下, 直线 B 就是方程式(16)的移动轨迹。故两条等时线的交点(Q 点)即能满足方程式(16)的条件, 也能满足方程式(17)的条件。Q 点的坐标已知: $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t = 15.617$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t = 15.230$, 用这组铅同位素组成及方程式(17), 求出异常铅源岩的 $\mu_1 = 9.35$ 。异常铅等时线与 μ_1 增长曲线下交点的时间即为铅源岩的形成时间($t_1 = 2.707 \text{ Ga}$)。由此可见, 当 $t_2 > 0 \text{ Ma}$ 时, 作图法直接求 μ_1 值所获得之结果与上述计算法的结果完全相同。

4 结 语

正如 Stacey 等(1980)和 Kanasewich 等(1965)所指出的, 在全球许多地区, 取自成矿区方铅矿样品的铅同位素组成呈线性关系是非常普遍的。比如, 在 Abitibi 带不同地区, 无论是块状硫化物矿床及后期脉状矿化还是整合层控金矿床及有关脉状矿化, 它们的铅同位素组成构成了多组二次等时线, 为成

矿作用及成矿物质来源的研究提供了十分有用的信息(Franklin et al., 1983)。尽管如此, 要想获得一条好的二次等时线并非易事。因此, 在实际工作中, 一旦获得了这类好资料, 要特别珍惜它, 不要只满足于用二次等时线去求矿化(或成岩/变质)年龄, 更要进行深入分析, 合理地计算成岩-成矿物质来源区 U-Th-Pb 体系的特征参数—— μ_1 、 ω_1 、 κ_1 及 $(\text{Th}/\text{U})_1$ 。简明地介绍 μ_1 值的计算方法, 就是本文的目的。关于 ω_1 、 κ_1 、 $(\text{Th}/\text{U})_1$ 的计算公式, 可依此类推, 此处不再赘述。

本文全部计算结果均采用笔者等自编的程序“PBPROG”完成。

感谢: 笔者曾得到西澳大利亚工程技术大学应用物理系 David R. Nelson 博士及南京大学地球科学系蒋少涌博士真诚的帮助, 在此向他们表示衷心的感谢。

References

- Chapman H J and Moorbath S. 1977. Lead isotope measurements from the oldest recognized Lewisian gneisses of north-west Scotland[J]. Nature, 268(7): 41~42.
- Cumming G L and Richards J R. 1975. Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth[J]. EPSL, 28: 155~171.
- Franklin J M, Roscoe S M, Loveridge W D. et al. 1983. Lead isotope studies in Superior and southern Provinces[J]. Bulletin of Geological Survey of Canada, 351: 1~54.
- Kanasewich E R and Farquhar R M. 1965. Lead isotope ratios from the Cobalt Noranda area, Canada[J]. Can. J. Earth Sci., 2: 361~384.
- Moorbath S, Welke H and Gale N H. 1969. The significance of lead isotope studies in ancient, high-grade metamorphic basement complexes, as exemplified by the Lewisian rocks of north-west Scotland[J]. Earth Planet. Sci. Letters, 6: 245~256.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. EPSL., 26: 207~221.
- Stacey J S, Bruce R D, Ralph J R, et al. 1980. A lead isotope study of mineralization in the Saudi Arabian Shield[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 74: 175~188.
- Whitehouse M J and Moorbath S. 1986. Pb-Pb systematics of Lewisian gneisses: Implications for crustal differentiation[J]. Nature, 319(6): 488~489.

Calculation of μ_1 value in two-stage system of lead evolution

HAN Fa and LI Zhen-qing

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

Abstract

The study on secondary isochron of anomalous lead is a very important problem in the common lead isotope geology. When the source age of anomalous lead was determined by the secondary isochron information, it will be often met how to calculate the μ_1 value of source rocks. The three approaches of calculation of μ_1 value are introduced in detail in this paper. Approach I, calculation of μ_2 value firstly: $\mu_2 = \frac{A-C}{B-D}$. ① For Stacey-Kramers

model, $A = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - a_0}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}$, $B = \frac{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}$, $C = 137.88 \times \frac{({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - b_0}{e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}}$, $D = \frac{e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}}{e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}}$,

and then $\mu_1 = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - a_0 - \mu_2(e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2})}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}$; ② For Cumming-Richards model, $A =$

$\frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - a_0}{e^{\lambda t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]}$, $B = \frac{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}}{e^{\lambda t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]}$, $C = 137.88 \times$

$\frac{({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - b_0}{e^{\lambda_2 t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] - e^{\lambda_2 t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda_2})]}$, $D = \frac{e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}}{e^{\lambda_2 t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] - e^{\lambda_2 t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda_2})]}$, and then $\mu_p =$

$\frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - a_0 - \mu_2(e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2})}{e^{\lambda t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]}$, $\mu(t_0) = \mu_p(1 - \alpha_0)$, $\mu(t_1) = \mu_p(1 - \alpha_1)$. Approach II, calculation of $({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_1}$ firstly: $({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_1} = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - B({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_2} - (b_0 - A \cdot a_0)}{A - B}$. ① For

Stacey-Kramers model, $A = \frac{1}{137.88} \times \frac{e^{\lambda_2 t_0} - e^{\lambda_2 t_1}}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}$, $B = \frac{1}{137.88} \times \frac{e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}}{e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2}}$, and then $\mu = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_1} - a_0}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}$;

② For Cumming-Richards model, $A = \frac{e^{\lambda_2 t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda_2})] - e^{\lambda_2 t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda_2})]}{137.88\{e^{\lambda t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]\}}$, $B = \frac{e^{\lambda_2 t_1} - e^{\lambda_2 t_2}}{137.88(e^{\lambda t_1} - e^{\lambda t_2})}$,

and then $\mu_p = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{t_1} - a_0}{e^{\lambda t_0}[1 - \alpha(t_0 - \frac{1}{\lambda})] - e^{\lambda t_1}[1 - \alpha(t_1 - \frac{1}{\lambda})]}$, $\mu(t_0) = \mu_p(1 - \alpha_0)$, $\mu(t_1) = \mu_p(1 - \alpha_1)$.

Approach III, calculation of μ value directly by graphic method: ① to determine the point of intersection of the secondary isochron with geochron (point Q as in Fig.2, when $t_2 = 0$ Ma for whole-rocks isochron) or with the primary isochron for t_2 of mineralization age (point Q as in Fig.4, when $t = t_2 > 0$ Ma for sulfide isochron) in ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ vs. ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ diagram; ② to calculate the ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ ratio of point Q, and then

$$\mu_1 = \frac{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_Q - a_0}{e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t_1}}.$$

Key word: geochemistry, Pb isotope composition, secondary isochron; calculation of the μ value, typical examples