

文章编号:0258-7106 (2004) 01-0077-05

P 点铅及其应用意义

韩发 孟祥金

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 在铅同位素研究中,异常铅是经常遇到并难于解释的问题。在一个矿区或矿带范围内,某些矿床的铅同位素资料中往往显示存在两种类型的铅:具有单阶段演化历史的正常铅和具有两个(或多个)阶段演化历史的异常铅。在常规的铅同位素组成图解上,这两种铅的数据点有时构成异常铅等时线,正常铅则位于等时线上含放射性成因铅最低的位置处。如果这种正常铅能给出合理的矿化年龄,并且该年龄与容矿围岩的成岩年龄基本一致,但显著老于异常铅瞬间增长模式年龄,那么,这种正常铅可能是异常铅等时线的起点,笔者称其为 P 点铅。显然,异常铅是后期放射性成因铅加入到 P 点铅形成的,P 点铅的模式年龄为异常铅来源区的年龄。利用 P 点铅及异常铅等时线的资料,可以计算获得异常铅的矿化年龄。因此,P 点铅这个概念的提出,为探讨矿化年龄问题开辟了一条新途径。文章还以加拿大和北欧地区某些矿床的铅同位素资料为例,讨论了在实际成矿过程中是否有 P 点铅存在的问题,讨论了 P 点铅在矿床成因研究中的重要意义,并给出了如何判断 P 点铅的具体条件。

关键词 地球化学 铅同位素 P 点铅 地质实例 应用意义

中图分类号:P597+.1

文献标识码:A

异常铅是铅同位素研究中经常遇到的复杂问题之一。在一个矿田或矿带范围内,某些矿床的铅同位素组成往往形成异常铅等时线。但是,在一些矿床中,有时异常铅与正常铅并存。在常规的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上,这两种铅位于同一条等时线上,并且正常铅中放射性成因铅的含量总是最低的。如何解释这些问题并从中获得有益的成矿信息,这就是本文的目的。为此,笔者提出了 P 点铅的概念并以具体实例讨论之。

1 何为 P 点铅

图 1 为异常铅的同位素演化图。铅最初沿着一条 $\mu = 8.99$ 的增长曲线演化,当时间为 t_1 时(此时 Pb 在 P 点),这种铅过渡到第二个体系中。在第二个体系组成多变、具有多个不同 μ 值的情况下(设 $\mu_2 = 20, \mu'_2 = 40$),这时铅同位素从 P 点起沿着发散的增长曲线继续演化。假设在 t_2 时受另外一次地质事件影响,放射性成因铅从第二个体系中活化出来,这样便形成了一条二次等时线,假定其斜率为 m 。在第二个体系组成均一、只有一个统一 μ 值的情况

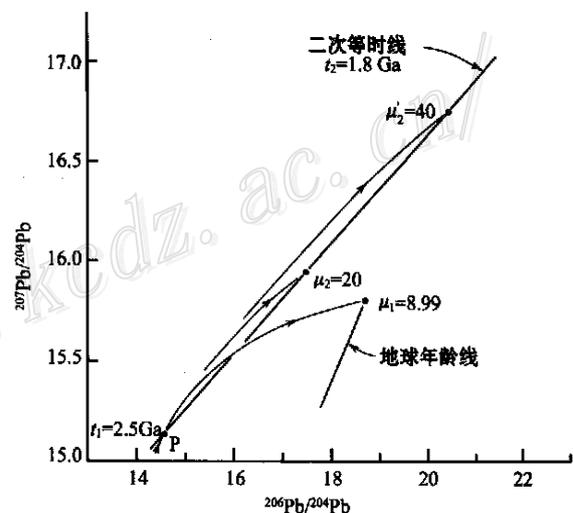


图 1 异常铅同位素演化图(据 Faure,1977 修改)

Fig.1 Isotope evolution of a suite of two-stage leads that form an anomalous lead line (after Faure, 1977)

下,在 t_2 时,放射性成因铅将以不同的量与 P 点的铅相混合,形成一条混合异常铅线(详见后述)。不管是哪种情况,这些异常铅等时线均满足以下方程:

$$m = \frac{1}{137.88} \left(\frac{e^{\lambda t_r} - e^{\lambda t_s}}{e^{\lambda t_r} - e^{\lambda t_s}} \right),$$

式中 t_r 为铅源年龄, t_s 为矿化年龄。方程中 m 已知, t_r 可以用 P 点的铅同位素组成及单阶段演化模式计算获得, 故 t_s 可求。显然, 用 P 点的铅同位素比值及异常铅等时线的斜率, 可以计算获得含异常铅矿床的成矿年龄。综上可见, P 点的铅同位素组成既具有单阶段正常铅的性质, 又是异常铅等时线的起点, 具有特殊意义, 特称之为 P 点铅。

P 点铅的定义如下: 当某异常铅二次等时线与单阶段正常铅增长曲线相交于 P 点时, 若 P 点是其并入的第二个体系铅同位素演化的起点, 且该点铅的模式年龄显著老于异常铅瞬间增长模式年龄, 那么前者则是后者源区的年龄。在此情况下, P 点所代表的铅同位素组成特称之为 P 点铅。

2 地质实例

上述关于 P 点铅的认识是否纯属理论设想, 在实际成矿过程中是否有 P 点铅存在, 这是 P 点铅问题的关键所在。下面就以某些地质实例讨论这个问题。

2.1 Geneva Lake 矿床

Geneva Lake 矿床位于加拿大太古宙绿岩带层位中。该矿床是一个富 Pb-Zn 的 VMS 型矿床, 后来遭到了强烈的变形、变质作用, 既有高度再结晶的块

状硫化物矿石, 也有富含硫化物的脉状矿化。许多作者对该矿床的铅同位素进行了研究 (Cumming et al., 1975; Franklin et al., 1983; Pearson, 1980; Stacey et al., 1969; 1975), 并曾把它作为确定“模式增长曲线”的数据点之一。如图 2 所示, Geneva Lake 矿床的铅同位素数据点构成了一条二次等时线, 其斜率 $m=0.328$ 。从图 2 可以看出, 该矿床 2 个含放射性成因铅低的样品单独构成了一组, 其平均模式年龄为 2 790 Ma ($\mu=10.7$)。这个年龄值与苏必利尔地区太古宙火山岩的成岩年龄 2 670 ~ 2 750 Ma 基本一致, 也与 Noranda、Mattagami 地区 VMS 型矿床方铅矿的平均模式年龄 2 739 Ma 一致 (Franklin et al., 1983), 但显著老于异常铅瞬间增长模式年龄 2 366 Ma。由此可以认为, Geneva Lake 矿床中含放射性成因铅低的样品具有单阶段演化历史, 能够给出合理的矿化年龄。从图 2 还可以看出, 其余数据点沿着二次等时线分布, 这些异常铅的成分可能是放射性成因铅加入到普通铅中的结果。事实上, 那组含放射性成因铅低, 具有 2 790 Ma 模式年龄的铅就是这种普通铅的代表, 也就是 P 点铅。已知 P 点铅的矿化年龄及异常铅等时线斜率, 计算获得异常铅矿化作用发生在 1 850 Ma。区域地质研究证明, 这次矿化事件可能是由火成岩侵入作用或早平诺克造山活动引起的 (Franklin et al., 1983)。

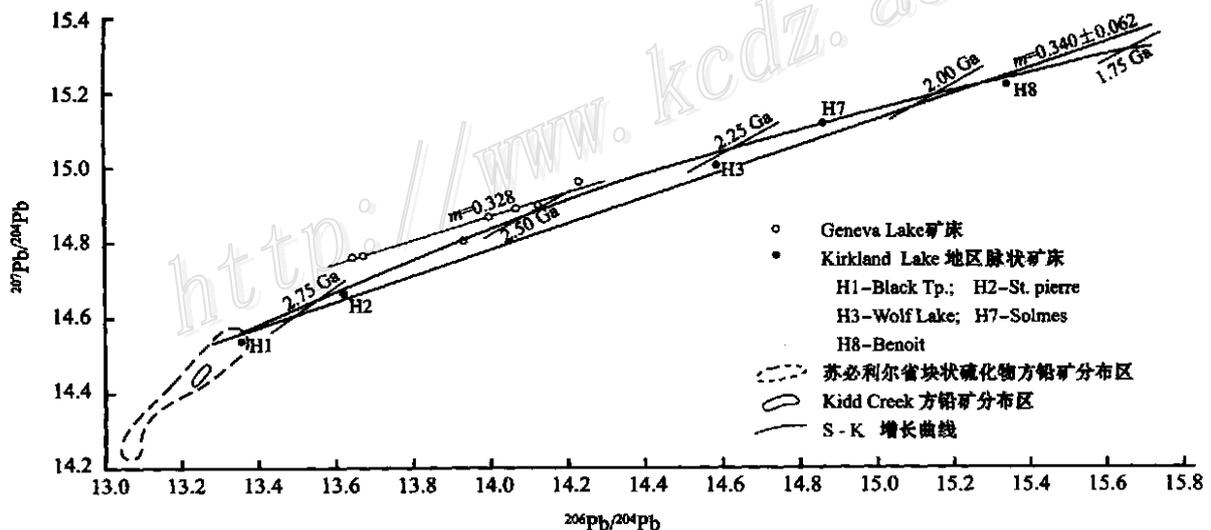


图 2 加拿大 Geneva Lake 火山型块状硫化物矿床和 Kirkland Lake 地区脉状硫化物矿床方铅矿的铅同位素组成 (据 Franklin et al., 1983)

Fig. 2 Lead isotope composition of galena samples from volcanic-hosted massive sulfide deposits in Geneva Lake area and from sulfide veins in Kirkland Lake area, Superior Province, Canada (after Franklin et al., 1983)

2.2 Kirkland Lake 地区的矿脉

Kirkland Lake 位于加拿大安大略省。该区脉状矿床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,脉石矿物主要为石英、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 $m = 0.340 \pm 0.062$ (图 2)。从图 2 可见,Black Tp. 矿床的铅同位素组成(H1 点)落在太古宙块状硫化物方铅矿铅同位素组成区域之内,St. Pierre 矿床的铅同位素组成(H2 点)位于该区的上方附近。H1 点与 H2 点平均铅模式年龄为 2 754 Ma,与苏必利尔地区太古宙火山岩的成岩年龄基本一致,但显著老于异常铅瞬间增长模式年龄 2 049 Ma。这说明,这些脉可能与太古宙火山岩是准同生的(尤其是 Black Tp. 矿床),它们的铅具有单阶段演化历史,并与容矿火山岩同源。有些脉中可能只有少量放射性成因铅加入(例如 St. Pierre 矿床),它们的铅同位素比值略有提高。该区其余 3 个矿床(图 2 中 H3 点、H7 点、H8 点)的铅都是异常铅,它们与 H1 点、H2 点共同构成了一条异常铅等时线。如上所述,这些异常铅的成分可能是后期放射性成因铅加入到 H1 点、H2 点普通铅中的结果。显然,H1、H2 两个点的铅具有 P 点铅特征。利用 P 点铅平均模式年龄及异常铅等时线斜率,计算获得含异常铅矿床的矿化年龄为 2 020 Ma。

类似上述的情况也见于世界其他地区的矿床中。例如在北欧 Svecokarelian 成矿带,许多矿床产于元古宙火山沉积岩系层位中。其中 Rappen 地区 Fe-Zn-Cu 矿床的铅有两种类型:正常铅和异常铅。正常铅的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为 15.068~15.243, 15.121~15.240, 34.801~35.216 (Romer, 1993),与 Svecokarelian 古元古代 VMS 型矿床的铅同位素组成基本一致 (Richard et al., 1984; Johansson et al., 1984),其铅模式年龄为 1 860~1 960 Ma,与 Fennoscandian 地盾古元古代火山岩的成岩年龄一致 (Lundqvist, 1979; Weihed et al., 1991)。在常规铅同位素组成图解上,这两类铅的数据点构成了一条等时线,其斜率 $m = 0.1255$,瞬间增长模式年龄为 1 207 Ma,明显年轻于正常铅平均模式年龄。这些资料说明,正常铅矿化是同生或准同生的,而后放射性成因铅加入到该正常铅中形成了异常铅。对于异常铅等时线而言,正常铅具有 P 点铅的特征。取 P 点铅的模式年龄为 1 860 Ma,用异常铅等时线斜率,计算获得异常铅矿化年龄为

343 Ma。这个矿化年龄比假设的该区矿化年龄为 400 Ma 更准确些 (Romer, 1993)。

从上述地质实例可以看出,这些矿床的铅都有两种类型:具单阶段演化历史的正常铅和具两阶段演化历史的异常铅。前者虽然位于异常铅等时线上,但其放射性成因铅的含量最低,模式年龄与容矿围岩的成岩年龄近等,但显著老于异常铅瞬间增长模式年龄,属于 P 点铅。

2.3 Temagami 矿山公路的黄铁矿

Temagami 黄铁矿矿床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。在实验过程中,用热盐酸对部分黄铁矿样品进行了淋滤,然后对淋滤液及残留物分别进行了铅同位素测定 (Franklin et al., 1983)。如图 3 所示,14 个数据点构成了一条异常铅等时线,其斜率 $m = 0.293 \pm 0.043$ 。这条异常铅线由 3 种成分组成:未淋滤的黄铁矿、淋滤液和残留物。在异常铅线上,淋滤相的铅同位素组成最富含放射性成因铅,它们单独构成一个组,其模式年龄为 1 670 Ma ($\mu = 9.31$);相反,残留相含放射性成因铅最低,它们亦单独构成一个组,位于太古宙块状硫化物分布区附近,其模式年龄为 2 707 Ma ($\mu = 9.31$)。这个年龄与苏必利尔地区太古宙火山岩的成岩年龄及 VMS 型矿床的矿化年龄一致,但显著老于异常铅瞬间增长模式年龄 2 229 Ma。因此,这种脉状黄铁矿可能与容矿火山岩是准同生的,并在其形成时就获得了组成很均一的痕量铅。这种铅可能来自容矿安山岩,具有 P 点铅的特征。用 P 点铅模式年龄及异常铅等时线斜率,计算获得放射性成因铅再次被活化出来的时间为 1 650 Ma ($\mu = 9.24$)。这个年龄及 μ 值与

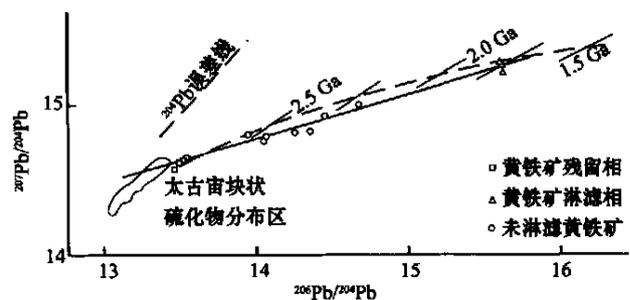


图 3 Temagami 矿山公路黄铁矿的淋滤相、残留相和未淋滤样品的铅同位素组成 (据 Franklin et al., 1983)

Fig. 3 Lead isotope composition of unleached and residual pyrite analyses with leach solutions for pyrite from Temagami Mine Road occurrence (after Franklin et al., 1983)

淋滤相平均铅模式年龄及 μ 值一致,证明了放射性成因铅也来自容矿安山岩,异常铅线是由残留相铅和淋滤相铅以不同数量混合形成的混合等时线。显然,Te magami 矿山黄铁矿是异常铅混合等时线中含有 P 点铅的典型实例。

3 应用意义

对于异常铅等时线方程而言,那里存在着两个未知数: t_r (源区年龄)、 t_s (矿化年龄)。在 t_r 和 t_s 之间,已知其中一个,便可求另一个。但是,在解决实际问题时,无论是 t_r ,还是 t_s 都十分难于确定。本文的目的就在于,在某些特定条件下,如何利用铅同位素资料,探讨成矿源区的年龄,从而为确定矿化年龄开辟一条新途径。比如,在大规模火山岩发育地区,那里经常存在着同生和后生两种类型的矿化。在某些情况下,在常规铅同位素组成图解上,这两类矿化的铅同位素组成数据点往往构成异常铅等时线。如果其中含放射性成因铅数量最低者满足 P 点铅的条件,则该种铅的模式年龄为 t_r ,于是含异常铅矿床的矿化年龄(t_s)便可计算获得。因此,在一个矿区或矿带范围内,只要获得了 P 点铅的资料,就可以利用异常铅等时线求出含异常铅矿床的矿化年龄。

根据 P 点铅是否存在,可以将异常铅等时线分为 P 点铅型和非 P 点铅型。上述资料证明,P 点铅型矿床的成矿物质均来自容矿围岩,而不是来自引起热事件的岩浆期后热液,显然,这为研究成矿物质来源及矿床成因提供了十分有益的信息。

另外,在实际研究工作中,由于铅同位素资料复杂而又多变,P 点铅的确定并非易事。比如,在研究加拿大太古宇层位中 Cobalt 脉状银-砷化物矿床成因的铅同位素证据时,17 个样品中只有 1 个样品具有太古宙铅模式年龄 2 840 Ma。正如 Thorpe(1974) 指出的那样,如果不对这个样品进行分析,就会得出错误的结论,把另外一组样品的铅模式年龄 2 280 Ma 作为同生硫化物沉积的真正年龄。正因为这样,笔者深信,P 点铅这个概念的提出,不只是揭示了客观存在的自然规律,更重要的是,它将有助于提高对这种客观事实的认识能力。

为了正确判断是否有 P 点铅存在,笔者提出以下判别条件:

(1) 与 P 点铅有关的矿床应该是同生或准同生矿床;(2) P 点铅能够给出合理的矿化年龄;(3) 异

常铅等时线的瞬间增长模式年龄应显著小于 P 点铅的模式年龄或显著小于 P 点铅矿床容矿围岩的成岩年龄;(4) 根据 P 点铅及异常铅等时线计算获得的成矿年龄在地质解释上是合理的。

在地质历史中,铅同位素的演化渐趋复杂,故 P 点铅的应用受到了一定的限制。一般情况下,前寒武纪矿床中的铅往往具有单阶段演化历史,存在 P 点铅的可能性较大,因此,上述方法具有重要的应用意义。显生宙矿床中存在 P 点铅的可能性较小,其应用前景较差。但是,现有资料证明,某些显生宙矿床中也有正常铅存在。如澳大利亚新南威尔士的 Captain Flat 矿床、Cober 矿床、Halls Peak 矿床(Ostic et al., 1967) 及加拿大新布伦瑞克的 Bathurst 矿床(Stacey et al., 1975) 中的铅均属正常铅。这 4 个矿床的铅既被 Stanton 等(1959) 拟合整合矿床铅增长曲线时选作代表性矿床,也被 Stacey 等(1975) 拟合两阶段铅演化模式时选作典型实例。这些铅同位素给出的模式年龄与其他年代学方法给出的成矿年龄只差 20 ~ 50 Ma,比较接近实际。因此,在显生宙的矿床中,不排除存在 P 点铅型等时线的可能性。

References

- Cumming G L and Richards J R. 1975. Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 28: 155 ~ 171.
- Faure G. 1977. Principles of isotope geology[M]. Smith and Wylie intermediate geology series. New York: John Wiley & Sons. 249 ~ 252.
- Franklin J M, Roscoe S M, Loveridge W D, et al. 1983. Lead isotope studies in Superior and Southern Provinces, Canada[J]. *Bulletin* 351, Geological Survey of Canada. 1 ~ 54.
- Johansson A and Rickard D. 1984. Isotope composition of Phanerozoic ore leads from the Sweden segment of Fennoscandian Shield[J]. *Miner. Deposita*, 19 (4): 249 ~ 255.
- Lundqvist T. 1979. The Precambrian of Sweden[J]. *Sver. Geol. Unders. Ser. C.*, 786: 1 ~ 87.
- Ostic R G, Russell R D and Stanton R L. 1967. Additional measurements of the isotopic composition of lead from stratiform deposits [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 4: 245 ~ 269.
- Pearson W. 1980. Copper metallogeny, Northshore region of Lake Huron[D] [Ph. D. thesis]. Queen's University, Kingston Ontario, 403p.
- Rickard D T and Svensson S Å. 1984. Ore lead isotope variations in the Proterozoic massive pyrite deposit at Näsleden, Skellefte district, Sweden[J]. *Miner. Deposita*, 19 (2): 145 ~ 151.
- Romer R L. 1993. Metallogeny and lead isotopic composition of base

- metal sulfide deposits in the Rappen area northern Sweden[J]. Miner. Deposita, 28 (1) : 37 ~ 46 .
- Stacey J S, Delevaux M E and Ulrych T J. 1969 . Some triple-filament lead isotope ratio measurements and an absolute growth curve for single stage lead[J]. Earth Planet. Sci. Lett. , 6 : 16 ~ 25 .
- Stacey J S and Kramers J D. 1975 . Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. Earth Planet. Sci. Lett. , 26 : 207 ~ 221 .
- Stanton R L and Russell R D. 1959 . Anomalous leads and the emplacement of lead sulfide ores[J]. Econ. Geol. , 54 : 588 ~ 607 .
- Thorpe R. 1974 . Lead isotope evidence on the genesis of the silver-arsenide vein deposits of the Cobalt and Great Bear Lake areas , Canada[J]. Econ. Geol. , 69(6) : 777 ~ 791 .
- Weiheid P and Schöberg H. 1991 . Age of porphyry-type deposits in the Skellefte deposit , northern Sweden[J]. Geol. Fören. Stockholm. Förh. , 113 : 289 ~ 294 .

P Point Lead and Its Application to Metallogeny

Han Fa and Meng Xiangjin

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

Abstract

In the study of the lead isotopes of a particular orebody or a special ore district , anomalous leads frequently constitute a quite complicated problem whose interpretation is rather difficult . Among the lead isotope ratio data from some ore deposits in a certain orefield or metallogenic belt , there often exist two kinds of leads , namely ordinary leads with single-stage model of evolution and anomalous leads with multi-stage model of evolution . The isotope ratios of these leads sometimes form a secondary isochron in coordinates of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ or $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, and ordinary leads are located at the position of the least radiogenic leads in the isochron . If the ordinary leads can yield an acceptable age for the mineralization which corresponds to the age of surrounding rocks but is much older than the instantaneous growth model age of anomalous leads , the component of ordinary leads may be the initial lead of the anomalous line . In this case , such ordinary leads are defined as the P point lead . Obviously , anomalous compositions result from the addition of radiogenic leads to the common lead as represented by the P point lead , and the model age of the P point lead is identical with the source age of anomalous leads . Mineralization age of anomalous leads extracted from the surrounding rocks can be computed by using the model age of the P point lead and the anomalous line slope . Therefore , the proposed idea of P point lead has opened a new way to study the mineralization ages . Exemplified by the lead isotope data from such deposits as Geneva Lake deposit , Kirkland Lake veins and Temagami Mine Road occurrence in Canada , and base metal sulfide deposits in the Rappen area , northern Sweden , this paper discusses the problem whether or not the idea of P point lead corresponds to the reality of the mineralization process , and illustrates the significance of applying the P point lead to the study of ore deposit genesis . Finally , this paper puts forward the identification criteria for the existence of P point lead in a certain ore deposit or mineralization belt .

Key words : geochemistry , lead isotope , P point lead , geological examples , significance of application